

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E ESTATÍSTICA**

Jocimara Segantini Ferranti

**MODELO DINÂMICO DE ENVELHECIMENTO E
RISCO: APLICAÇÃO DE INDICADORES DE RISCO NA
DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE MORTE E
NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS**

Florianópolis

2012

Jocimara Segantini Ferranti

**MODELO DINÂMICO DE ENVELHECIMENTO E
RISCO: APLICAÇÃO DE INDICADORES DE RISCO NA
DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE MORTE E
NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Ciência da Com-
putação para a obtenção do Grau de
Mestre em Ciência da Computação.
Orientador: Prof. Dr. Paulo José de
Freitas Filho

Florianópolis

2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

F373m Ferranti, Jocimara Segantini

Modelo dinâmico de envelhecimento e risco [dissertação] : aplicação de indicadores de risco na determinação da probabilidade de morte e na estimativa de parâmetros / Jocimara Segantini Ferranti ; orientador, Paulo José de Freitas Filho. - Florianópolis, SC, 2012.
143 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Inclui referências

1. Informática. 2. Ciência da computação. 3. Modelagem computacional. 4. Avaliação de riscos. 5. Envelhecimento. 6. Morte. I. Freitas Filho, Paulo José de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDU 681

Jocimara Segantini Ferranti

**MODELO DINÂMICO DE ENVELHECIMENTO E
RISCO: APLICAÇÃO DE INDICADORES DE RISCO NA
DETERMINAÇÃO DA PROBABILIDADE DE MORTE E
NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Ciência da Computação”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Florianópolis, 16 de fevereiro 2012.

Prof. Dr. Ronaldo dos Santos Mello
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo José de Freitas Filho
Orientador

Profa. Dra. Maria Marlene de Souza Pires
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Renato de Mello
Universidade do Estado de Santa Catarina

Profa. Dra. Silvia Modesto Nassar
Universidade Federal de Santa Catarina

À razão de tudo:
minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha amada mãe, Arlete, e ao meu amado irmão, Jocenei, por estarem sempre ao meu lado e terem as palavras certas para me oferecer. Obrigada por tudo.

Ao professor Paulo Freitas, pela oportunidade, confiança e paciência. Obrigada pelo auxílio despendido a todo momento com este trabalho.

Aos professores André Junqueira Xavier, Eleonora d’Orsi e Luiz Roberto Ramos pela disponibilidade e auxílio na obtenção dos dados que subsidiaram o desenvolvimento desta pesquisa.

À professora Silvia Modesto Nassar por toda contribuição durante o desenvolvimento deste mestrado.

Aos colegas de estudo, especialmente Andreia Schwaab, Guilherme Steinmann e Cassio Conti, pelos momentos de dúvidas e descobertas compartilhados.

Aos amigos Rogério Santos Pozza e Francisco Pereira Júnior por ajudarem a formar uma base imprescindível para a realização deste mestrado.

Aos amigos de todas as horas Marco Pimenta e Camilo Dotto pelas palavras de motivação e pela paciência. Em especial, ao amigo Igor Vilas Boas Tromel, por não ter poupado esforços para me ajudar com esta pesquisa.

Enfim, à todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

*A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.*

Albert Einstein

RESUMO

As técnicas computacionais de modelagem e simulação de sistemas constituem uma ferramenta importante no entendimento da dinâmica de processos complexos, pois são capazes de representar as relações existentes entre os diversos elementos dos sistemas. Em associação com outras técnicas computacionais, como a modelagem *fuzzy*, os modelos de simulação podem se tornar uma ferramenta ainda mais poderosa, ampliando e aperfeiçoando as formas de representação da realidade. Especificamente na área médica e de saúde, a existência de complexidades e incertezas é notável. Entre os diversos temas abordados nessa área, o processo de envelhecimento e morte, inerente a todos os seres vivos, tem sido foco de estudos há muitos anos. Entretanto, a falta de experimentação e de modelos de simulação relacionados a esse assunto ainda é evidente.

Neste contexto, esta dissertação realizou o estudo e a ampliação de um modelo de simulação de envelhecimento e morte existente com o objetivo de aperfeiçoar a representação da realidade de populações consideradas homogêneas quanto a indicadores de risco relacionados a doenças cardiovasculares. O modelo que serviu de base para este trabalho, além de representar a capacidade fisiológica do indivíduo e a geração de eventos de risco no decorrer da vida, trata do impacto causado pelos eventos ocorridos e do processo de recuperação da saúde.

A ampliação do modelo consistiu na inclusão de fatores de risco representativos dos hábitos de vida e das condições de saúde da população. Estes fatores indicam a probabilidade do indivíduo que apresenta determinadas características ser acometido ou morrer vítima da causa de morte em avaliação. Os elementos incorporados no modelo são provenientes das tábuas de vida de Harvey Geller, que utilizam características como sexo, idade e indicadores de risco para determinar a ocorrência de algum problema de saúde no decorrer da vida do indivíduo. No caso específico das doenças cardiovasculares, os indicadores de risco utilizados são sístole, diástole, colesterol, diabetes, atividade física, tabagismo e obesidade.

Os resultados do modelo ampliado foram validados por meio da reprodução de curvas reais de mortalidade que utilizam dados provenientes do estudo EPIDOSO e da Fundação SEADE do Estado de São Paulo. Os resultados obtidos se mostraram adequados dentro de uma margem de erro considerada aceitável. Com isso, o modelo ampliado

pode ser considerado válido tanto para a compreensão da influência dos indicadores de risco ao longo da vida do indivíduo quanto para a avaliação do impacto que mudanças nos indicadores causam na manutenção da saúde e na mortalidade da população.

A etapa de validação mostrou que para reproduzir resultados mais condizentes com as realidades estudadas são necessários diversos ajustes nos parâmetros do modelo. O projeto de experimentos realizado indicou que as taxas de envelhecimento e de reserva são os parâmetros cujas variações se mostram mais adequadas à reprodução das curvas de mortalidade estudadas. Diante disso, foi desenvolvido um módulo de inferência *fuzzy* que possibilita estimar os valores dessas taxas a partir dos indicadores de risco incorporados ao modelo. Os valores dos parâmetros estimados pelo módulo *fuzzy* se aproximam dos valores utilizados na validação do modelo, mostrando que a modelagem proposta é adequada para fornecer os valores dessas taxas a partir das características da população estudada. A incorporação desse sistema de inferência facilita a utilização do modelo, uma vez que dispensa o conhecimento aprofundado sobre o funcionamento do modelo, ou mesmo sobre a fisiologia humana, por parte do usuário no momento da definição dos parâmetros.

Palavras-chave: modelagem e simulação dinâmica, lógica fuzzy, modelo de envelhecimento, indicadores de risco

ABSTRACT

The computational techniques of modeling and simulation systems are an important tool in understanding the dynamics of complex processes. They are capable of representing the relationships between the various elements of the systems. In combination with other computational techniques, such as fuzzy modeling, simulation models can become an even more powerful tool, expanding and improving the ways of representing reality. Specifically in the medical and health knowledge areas, the existence of complexities and uncertainties is remarkable. Among the many topics covered in this area, the process of aging and death, inherent in all living beings, has been the focus of studies for many years. However, the lack of experimentation and simulation models related to this subject is still evident.

In this context, this dissertation conducted the study and expansion of an existing simulation model of aging and death in order to improve the representation of the reality of populations considered homogeneous as risk factors related to cardiovascular disease. Besides representing the physiological capacity of the individual and the occurrence of risk events during the life, the base model deals with the impact caused by the events and the process of recovery in health.

The expansion of the model was conducted with the inclusion of risk factors representative of the habits of life and health of the population. These factors indicate the likelihood that the individual with certain characteristics being affected or dying due to the cause of death in evaluation. The elements incorporated in the model are derived from life tables of Harvey Geller, that uses characteristics such as gender, age and risk indicators to determine the occurrence of any health problem during the life of the individual. The risk indicators used in the specific case of cardiovascular disease are systolic and diastolic blood pressure, cholesterol, diabetes, physical activity, smoking and obesity.

The results of extended model were validated through the reproduction of real curves that used mortality data from EPIDOSO project and SEADE Foundation of the State of São Paulo. The obtained results were considered adequate within an acceptable margin of error. Thus, the expanded model can be considered valid for the understanding of the influence of risk factors over the life of the individual and to assess the impact of changes in risk factors in maintaining health and mortality of the population.

The validation step indicated that various adjustments are needed in the model parameters to reproduce results more consistent with the studied realities. The conducted project of experiments indicated that the rate of aging and the rate of reserve are the parameters whose variations are more suitable for reproduction of the mortality curves studied. Therefore, it was developed a fuzzy inference module which allows to estimate the values of these rates from risk indicators incorporated in the model. The parameter values estimated by the fuzzy module are closer to the values used in model validation. It indicates that the proposed model is adequate to provide the values of these rates from the characteristics of the study population. The incorporation of this inference system facilitates the use of the model, since it dispenses the in-depth knowledge on the functioning of the model, or even on the human physiology, by the user when defining the parameters.

Keywords: dynamic modeling and simulation, fuzzy logic, aging model, risk factors

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Classificação dos sistemas (FREITAS FILHO, 2008).	33
Figura 2	Níveis de pensamento (MAANI; CAVANA, 2000).	36
Figura 3	Diagrama de fluxo.	38
Figura 4	Diagrama de ciclo (FORD, 1999).	39
Figura 5	Diagrama de fluxo de uma população (FORD, 1999).	40
Figura 6	Padrões lineares de comportamento.	41
Figura 7	Padrões exponenciais de comportamento.	42
Figura 8	Padrões <i>goal seeking</i> de comportamento.	42
Figura 9	Padrões oscilação de comportamento.	43
Figura 10	Padrões <i>s-shaped</i> de comportamento.	44
Figura 11	Fases da metodologia sistêmica (MAANI; CAVANA, 2000).	45
Figura 12	Modelo hierárquico de ignorância (AYYUB, 2001).	47
Figura 13	Exemplos de funções de pertinência: (a) trapezoidal, (b) triangular, (c) sigmoide e (d) gaussiana.	50
Figura 14	Exemplo de saída de processo fuzzy: (a) primeira parte da saída fuzzy, (b) segunda parte da saída fuzzy e (c) união das duas partes.	51
Figura 15	Exemplo de métodos de desfuzzificação: (1) menor dos máximos, (2) média dos máximos, (3) maior dos máximos e (4) centróide.	52
Figura 16	Curva de Gompertz.	58
Figura 17	Distribuição de Maxwell Boltzmann.	60
Figura 18	Representação de um indivíduo no modelo Penna (PENNA, 1995).	61
Figura 19	Modelo estocástico de envelhecimento e morte (SCHWAAB, 2009).	64
Figura 20	Comportamento da função de crescimento.	66
Figura 21	Comportamento da função Reserva.	67
Figura 22	Comportamento da função Envelhecimento.	68
Figura 23	Comportamento das funções Capacidade Total e Capacidade Relativa, considerando $TC = 0, 14$, $TR = 0, 139$, $TE = 0, 018$ e $I = 0$	69
Figura 24	Probabilidade de ocorrência de evento de risco depen-	

dente de idade.....	70
Figura 25 Probabilidade de ocorrência de evento de risco independente de idade.....	70
Figura 26 Função de pertinência para a variável idade.....	73
Figura 27 Função de pertinência para a variável impacto.....	74
Figura 28 Função de pertinência para a variável recuperação.....	75
Figura 29 Base de regras para recuperação.....	76
Figura 30 Superfície de resposta: recuperação da saúde.....	77
Figura 31 Diagrama do modelo base com a influência dos fatores (adaptado de (SCHWAAB, 2009)).....	78
Figura 32 Proposta de ampliação do modelo.....	79
Figura 33 Cálculo do Fator de Risco Composto (<i>FRC</i>).....	81
Figura 34 Casos simulados para o projeto de experimentos.....	86
Figura 35 Resultados do modelo para o caso 1.....	102
Figura 36 Resultados do modelo para o caso 2.....	103
Figura 37 Resultados do modelo para o caso 3.....	104
Figura 38 Resultados do modelo para o caso 4.....	106
Figura 39 Função de pertinência para a variável sístole.....	109
Figura 40 Função de pertinência para a variável diástole.....	109
Figura 41 Função de pertinência para a variável pressão alta.....	110
Figura 42 Base de regras para pressão alta.....	111
Figura 43 Superfície de resposta: pressão alta.....	112
Figura 44 Função de pertinência para a variável glicose.....	113
Figura 45 Função de pertinência para a variável diabetes.....	114
Figura 46 Base de regras para diabetes.....	115
Figura 47 Superfície de resposta: diabetes.....	116
Figura 48 Função de pertinência para a variável peso em percentual relativo.....	116
Figura 49 Função de pertinência para a variável obesidade.....	118
Figura 50 Base de regras para obesidade.....	118
Figura 51 Superfície de resposta: obesidade.....	119
Figura 52 Função de pertinência para a variável envelhecimento.....	120
Figura 53 Base de regras para envelhecimento.....	121
Figura 54 Função de pertinência para a variável reserva.....	122
Figura 55 Base de regras para reserva.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros escalares da variável idade.....	73
Tabela 2	Parâmetros escalares dos conjuntos forte e fraco da variável impacto.....	74
Tabela 3	Parâmetros escalares dos conjuntos leve e moderado da variável impacto.....	75
Tabela 4	Parâmetros escalares dos conjuntos estável e rápida da variável recuperação.....	75
Tabela 5	Parâmetros escalares dos conjuntos lenta e moderada da variável recuperação.....	76
Tabela 6	Demais parâmetros do modelo para ANOVA da taxa de crescimento.....	87
Tabela 7	ANOVA da taxa de crescimento (p valor).....	87
Tabela 8	Demais parâmetros do modelo para ANOVA da taxa de reserva.....	88
Tabela 9	ANOVA da taxa de reserva (p valor).....	88
Tabela 10	Demais parâmetros do modelo para ANOVA da taxa de envelhecimento.....	89
Tabela 11	ANOVA da taxa de envelhecimento (p valor).....	89
Tabela 12	Demais parâmetros do modelo para ANOVA do fator dependente de idade.....	90
Tabela 13	ANOVA do fator dependente de idade (p valor).....	91
Tabela 14	Demais parâmetros do modelo para ANOVA do risco independente de idade.....	92
Tabela 15	ANOVA do risco independente de idade (p valor).....	93
Tabela 16	Caso 1.....	97
Tabela 17	Caso 2.....	97
Tabela 18	Caso 3.....	98
Tabela 19	Caso 4.....	98
Tabela 20	Parâmetros para o caso 1.....	101
Tabela 21	Resultado do modelo para o caso 1.....	101
Tabela 22	Parâmetros para o caso 2.....	102
Tabela 23	Resultados do modelo para o caso 2.....	103
Tabela 24	Parâmetros para o caso 3.....	104

Tabela 25 Resultados do modelo para o caso 3.....	104
Tabela 26 Parâmetros para o caso 4.....	105
Tabela 27 Resultados do modelo para o caso 4.....	105
Tabela 28 Parâmetros escalares da variável sístole.....	109
Tabela 29 Parâmetros escalares da variável diástole.....	110
Tabela 30 Parâmetros escalares da variável pressão alta.....	111
Tabela 31 Parâmetros escalares do conjunto moderada da variável glicose.....	113
Tabela 32 Parâmetros escalares dos conjuntos baixa e alta da variável glicose.....	113
Tabela 33 Parâmetros escalares do conjunto sim - não interfere da variável diabetes.....	114
Tabela 34 Parâmetros escalares dos conjuntos não e sim - interfere da variável diabetes.....	114
Tabela 35 Parâmetros escalares dos conjuntos média, +20 e +50 da variável peso.....	117
Tabela 36 Parâmetros escalares dos conjuntos -10 e +60 da variável peso.....	117
Tabela 37 Parâmetros escalares do conjunto sim - não interfere da variável obesidade.....	117
Tabela 38 Parâmetros escalares dos conjuntos não e sim - interfere da variável obesidade.....	118
Tabela 39 Parâmetros escalares dos conjuntos normal e moderado da variável envelhecimento.....	120
Tabela 40 Parâmetros escalares dos conjuntos lento e acelerado da variável envelhecimento.....	120
Tabela 41 Taxa de envelhecimento estimada para os casos de estudo.....	121
Tabela 42 Parâmetros escalares dos conjuntos normal e moderado da variável reserva.....	122
Tabela 43 Parâmetros escalares dos conjuntos lento e acelerado da variável reserva.....	123
Tabela 44 Taxa de reserva estimada para os casos de estudo.....	124

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	26
1.2 PROBLEMA	26
1.3 PROPOSTA	27
1.4 OBJETIVOS	28
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	33
2.1.1 Modelagem e Simulação	34
2.1.2 Modelagem Dinâmica Contínua	35
2.1.2.1 Blocos de Construção	37
2.1.2.2 Padrões Estruturais	38
2.1.2.3 Padrões Comportamentais	40
<i>Padrão Linear</i>	40
<i>Padrão Exponencial</i>	41
Goal Seeking	41
<i>Oscilação</i>	42
S-Shaped	43
2.1.3 Metodologia de Construção dos Modelos de Sistemas Dinâmicos	44
2.2 TRATAMENTO DA INCERTEZA	45
2.2.1 Modelagem Fuzzy	48
2.2.1.1 Aplicações de Simulação Dinâmica Fuzzy	52
2.3 TEORIAS E MODELOS DE ENVELHECIMENTO	54
2.3.1 Teorias de Envelhecimento	55
<i>Teorias baseadas em eventos propositais</i>	55
<i>Teorias baseadas em eventos aleatórios</i>	55
2.3.2 Mortalidade e Riscos	56
2.3.3 Modelos de Simulação de Envelhecimento	58
2.4 COMENTÁRIOS FINAIS	61
3 MODELO DE SIMULAÇÃO	63
3.1 MODELO ESTOCÁSTICO DE ENVELHECIMENTO E MORTE	63
3.1.1 Parâmetros do Modelo	65
<i>Taxa de Crescimento</i>	65
<i>Taxa de Reserva</i>	66

<i>Taxa de Envelhecimento</i>	66
<i>Fatores Dependentes da Idade</i>	68
<i>Risco Independente de Idade</i>	69
3.1.2 Nível de Risco	71
3.1.3 Módulo de Impacto e Recuperação da Saúde	72
3.1.4 Influência dos Fatores	77
3.2 PROPOSTA DE AMPLIAÇÃO DO MODELO	78
3.2.1 Fator de Risco Composto	79
3.2.2 Probabilidade de Morte	80
3.3 COMENTÁRIOS FINAIS	82
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO	85
4.1 PROJETO DE EXPERIMENTOS	85
<i>Taxa de Crescimento</i>	86
<i>Taxa de Reserva</i>	87
<i>Taxa de Envelhecimento</i>	88
<i>Fator Dependente de Idade</i>	90
<i>Risco Independente de Idade</i>	92
4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO	93
<i>Projeto EPIDOSO (RAMOS et al., 1998)</i>	95
<i>Fundação SEADE (SÃO PAULO, 2011)</i>	95
<i>Caso 1</i>	97
<i>Caso 2</i>	97
<i>Caso 3</i>	98
<i>Caso 4</i>	98
<i>Pressão alta</i>	99
<i>Diabetes</i>	99
<i>Obesidade</i>	99
<i>Atividade física</i>	100
<i>Caso 1</i>	101
<i>Caso 2</i>	101
<i>Caso 3</i>	103
<i>Caso 4</i>	105
4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MÓDULO DE ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	106
4.3.1 Pressão Alta	107
4.3.2 Diabetes	112
4.3.3 Obesidade	115
4.3.4 Envelhecimento	119
4.3.5 Reserva	122
4.4 COMENTÁRIOS FINAIS	124
5 CONCLUSÕES	125

5.1 PROPOSTA E RESULTADOS	126
5.1.1 Artigos	129
5.2 LIMITAÇÕES	130
5.3 TRABALHOS FUTUROS	131
REFERÊNCIAS	133
ANEXO A – Fator de Risco Composto	141

1 INTRODUÇÃO

Um sistema é constituído por um conjunto de elementos que se relacionam entre si com o objetivo de realizar um processo definido (ACKOFF, 1971). O elevado número de elementos presentes e suas relações fazem da complexidade uma característica inerente aos sistemas reais.

As transformações e relacionamentos entre os elementos, juntamente com fatores aleatórios, são os responsáveis por gerar as mudanças que ocorrem nos sistemas. Entretanto, compreender a evolução e a dinâmica de sistemas complexos pode não ser uma tarefa trivial. A modelagem e simulação de sistemas vem ao encontro dessa dificuldade com o objetivo de auxiliar no entendimento dos sistemas e possibilitar, inclusive, a realização de estudos como a previsão e o planejamento (FREITAS FILHO, 2008).

Sistemas biológicos, ecológicos, econômicos, de transporte e de produção podem facilmente ser citados como exemplos de sistemas complexos e, cada vez mais, fica mais evidente a necessidade de integração dessas áreas com a informática na tentativa de contribuir para o avanço, agilidade e qualidade das pesquisas realizadas.

Entre esses sistemas, a área da saúde possui uma diversidade de temas importantes para os seres humanos cujas pesquisas podem proporcionar, entre outros resultados, a descoberta de curas de doenças e o desenvolvimento de medicamentos. Esses estudos contribuem diretamente para a melhora da qualidade de vida dos indivíduos (HAYFLICK, 1997).

Outro tema bastante discutido por essa área é o processo de envelhecimento e morte inerente a todos os seres vivos. Apesar da sua complexidade e das várias teorias que o envolvem, esse processo não é comumente tratado por modelos de simulação. O desenvolvimento de uma ferramenta que represente os elementos envolvidos nesse processo pode ser útil para o acompanhamento de populações facilitando o entendimento dos diversos fatores e riscos associados ao envelhecimento. Mais que isso, pode possibilitar o planejamento de mudanças nos hábitos de vida relacionados a esses fatores, a fim de retardar e minimizar a ocorrência de doenças associadas a idade.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A utilização de técnicas computacionais, como a modelagem e simulação de sistemas, em diferentes áreas do conhecimento pode possibilitar uma maior agilidade e qualidade na obtenção de resultados e minimizar os custos e as dificuldades encontradas na realização de estudos diretamente nos sistemas reais.

Por serem capazes de representar as diversas relações existentes entre os elementos dos sistemas, os modelos de simulação constituem uma ferramenta computacional importante no entendimento da dinâmica de processos complexos. A associação de outras técnicas computacionais, como a Inteligência Artificial, podem tornar o modelo uma ferramenta ainda mais poderosa, ampliando e aperfeiçoando as formas de representação da realidade.

A pesquisa descrita neste trabalho aborda um modelo de simulação de envelhecimento e morte acrescentando fatores de risco relacionados a doenças cardíacas a fim de auxiliar no entendimento da interação entre esses fatores e a ocorrência das doenças associadas a idade. Com isso, espera-se aperfeiçoar os resultados para reproduzir situações reais de populações que possuam determinadas características.

Este trabalho pode ser considerado importante para, além de auxiliar no estudo de populações de indivíduos com características similares diante de situações de risco, contribuir para a compreensão do efeito que mudanças efetuadas nos parâmetros causam na população. Com isso, torna-se possível planejar e testar políticas e estratégias para prevenção de problemas.

Um modelo de simulação capaz de focalizar essas populações específicas torna possível verificar medidas alternativas para que a mortalidade causada por determinadas doenças diminua, contribuindo para a melhora da qualidade de vida dos indivíduos e para a redução de custos com políticas de saúde pública e privada.

1.2 PROBLEMA

O processo de envelhecimento e os elementos que, com o passar do tempo, tornam os seres humanos mais vulneráveis a problemas de saúde vem sendo alvo de estudos há muito tempo (HAYFLICK, 1997). Embora os avanços da medicina moderna tenham resultado no aumento da expectativa de vida da população, a busca pela longevidade e pela qualidade de vida ainda dependem muitos esforços.

Contudo, algumas doenças ainda podem ser citadas como as maiores causadoras de morte nos dias atuais, como as doenças relacionadas ao sistema circulatório e o câncer, representando grandes despesas para as iniciativas pública e privada. Esses gastos não ficam restritos somente ao setor de saúde. O sistema previdenciário também é bastante afetado, uma vez que algumas dessas doenças, quando não causam a morte, podem deixar sequelas.

A incidência desse tipo de doença está relacionada a diversos indicadores que expressam os hábitos de vida e as condições de saúde do indivíduo. As mudanças de hábitos de vida podem tanto agravar quanto amenizar a ocorrência dessas doenças entre a população. Um modelo de simulação que contemple o processo de envelhecimento e os fatores de risco associados às causas de morte é uma forma de auxiliar no entendimento dos fatores envolvidos nesse processo. Com isso, seria possível planejar estratégias para diminuir a incidência dessas doenças através da adoção de hábitos de vida apropriados. Em populações reais, a validação dessas estratégias só poderiam ser realizadas a longo prazo.

1.3 PROPOSTA

No contexto dos modelos de simulação para o processo de envelhecimento, este trabalho parte de uma ferramenta de simulação estocástica que utiliza modelagem dinâmica contínua e modelagem *fuzzy* desenvolvida como trabalho de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Catarina (SCHWAAB, 2009).

Esse modelo, além de representar as funções fisiológicas do indivíduo, como a capacidade funcional, a energia e o envelhecimento, expressa a ocorrência de eventos de riscos ao longo da vida do sujeito que podem ocorrer de forma acidental ou em consequência da idade, retratando tanto forças favoráveis quanto desfavoráveis à sobrevivência de uma pessoa. Diante da ocorrência de um problema, a intensidade do evento determina se o sujeito sobrevive ou não ao episódio e, caso o indivíduo sobreviva, um módulo de inferência *fuzzy* determina o quanto da sua saúde foi afetada e como a recuperação vai ocorrer com o passar do tempo.

O modelo foi originalmente utilizado para reproduzir as curvas de mortalidade da população do estado de Santa Catarina considerando duas causas de morte: mortalidade em geral e mortalidade por hipertensão. Entretanto, o modelo não considerou algumas características:

- Fatores de risco específicos que podem tanto agravar quanto amenizar a incidência de doenças que causam a morte na população.
- Mudanças apropriadas nos fatores de risco relacionados aos hábitos de vida podem tanto evitar quanto reverter condições agravantes dessas doenças, como hipertensão, colesterol e diabetes.

Diante das situações expostas, este trabalho propõe o aprimoramento do modelo original através da inclusão de indicadores de risco específicos para doenças cardíacas em um módulo que deve calcular o impacto desses indicadores na probabilidade de morte de indivíduos que compartilham as mesmas características. Além disso, a proposta inclui um módulo *fuzzy* capaz de estimar os parâmetros relacionados ao modelo a partir dos valores determinados para os indicadores de risco, possibilitando que o modelo seja utilizado por pessoas que não dispõem de conhecimento aprofundado acerca dos indicadores de risco e os efeitos que seus valores causam no comportamento do modelo.

Com isso, espera-se obter um modelo de simulação estratégico capaz de reproduzir curvas de mortalidade reais de populações consideradas homogêneas, para assim, possibilitar que diferentes políticas de mudanças de hábitos de vida sejam conferidas, a fim de avaliar o impacto dessas mudanças na mortalidade da população.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta de simulação estocástica para estudos do processo de envelhecimento e morte de indivíduos humanos possibilitando a utilização de indicadores de risco para expressar características relacionadas aos hábitos de vida e condições de saúde da população.

Para isso, as diversas etapas do trabalho caracterizam os seguintes objetivos específicos:

- Entender o modelo que serve de base para o desenvolvimento deste trabalho através de um projeto de experimentos, principalmente para a compreensão da sensibilidade dos fatores envolvidos;
- Desenvolver um módulo que utiliza os indicadores de risco para determinar a probabilidade do indivíduo ser acometido por doenças do coração e, conseqüentemente, vir a falecer devido à doença adquirida;

- Entender o impacto dos indicadores de risco sobre os parâmetros envolvidos no modelo de simulação para então desenvolver um módulo *fuzzy* que utiliza os indicadores para estimar os valores dos demais parâmetros do modelo de simulação;
- Avaliar os resultados do modelo para curvas de mortalidade de populações onde a morte é provocada especificamente por doenças do coração.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho seguiu, principalmente, a metodologia Dinâmica de Sistemas (FORRESTER, 1961), descrita mais adiante no capítulo 2. Diante de um contexto que envolve episódios complexos e mudanças que ocorrem continuamente ao longo do tempo, a metodologia utilizada contribuiu para que este modelo fosse entendido e desenvolvido adequadamente. Para isso foram realizadas as etapas:

1. Investigação preliminar do modelo e identificação das melhorias: A primeira das etapas consistiu no estudo inicial do modelo, com a avaliação do comportamento das equações, das estratégias e elementos existentes. Com isso foi possível identificar a forma como a inclusão dos indicadores de risco e cálculo da probabilidade de morte poderiam ser implementados.
2. Identificação da influência dos fatores: Essa etapa consistiu no estudo das relações de causa e efeito existentes entre os elementos do sistema, possibilitando a identificação dos tipos (positivo e negativo) e sentidos das influências entre as partes.
3. Implementação do simulador: O modelo proposto foi implementado em duas ferramentas - *Stella*[®] e *MatLab*[®]. O ambiente *Stella*[®] consiste em uma ferramenta de simulação dinâmica contínua com foco em projetos que utilizam a metodologia Dinâmica de Sistemas e proporciona elementos capazes de produzir diagramas de fluxos e de ciclo. A modelagem realizada nessa ferramenta facilitou o entendimento do problema estudado. Após o entendimento do modelo, ele foi construído também no ambiente *Matlab*[®], que possui uma ferramenta de simulação, chamada *Simulink*[®], que possibilita o desenvolvimento de modelos dinâmicos

contínuos e sua integração com diversas bibliotecas, entre elas a de lógica *fuzzy*.

4. Estudo do modelo ampliado através de um projeto fatorial: Para entender e identificar os parâmetros que mais influenciam o comportamento do modelo após a ampliação proposta, foi realizado um estudo através de um projeto fatorial simples que analisou cada um dos parâmetros independentemente. Esta atividade contemplou a quarta das etapas realizadas.
5. Validação do modelo: A validação do modelo ampliado se deu através da comparação das curvas de mortalidade geradas pelo modelo simulado com dados reais de mortalidade de diversas populações consideradas homogêneas no que diz respeito aos indicadores de risco.
6. Implementação do módulo *fuzzy* para estimativa dos parâmetros: A partir da observação da necessidade de alteração nos valores dos parâmetros para a simulação de cada caso de estudo, um sistema *fuzzy* foi modelado de acordo com os passos convencionais do raciocínio difuso (ZADEH, 1965). O objetivo desse módulo é estimar os valores dos parâmetros que definem o comportamento do modelo a partir dos valores dos indicadores de risco definidos para a população simulada.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos principais assuntos relacionados à pesquisa. A primeira parte descreve conceitos relacionados à modelagem dinâmica contínua com a apresentação da metodologia Dinâmica de Sistemas, dos blocos de construção de um simulador e dos padrões comportamentais observados nos sistemas. A segunda parte descreve um modelo hierárquico de ignorância e as diversas formas de tratamento das incertezas inerentes aos sistemas, com uma seção dedicada à uma breve descrição da técnica de modelagem *fuzzy*. Esse capítulo traz ainda uma síntese das teorias de envelhecimento e das ideias que serviram de embasamento para este e outros trabalhos inseridos neste contexto.

Os capítulos 3 e 4 agregam toda a modelagem da proposta, detalhando as diversas etapas dos procedimentos metodológicos. O capítulo 3 detalha o modelo que serviu de base para o desenvolvimento deste

trabalho, as equações e o comportamento dos elementos do modelo. É apresentada ainda a proposta de ampliação realizada no modelo com a inclusão dos indicadores de risco e sua utilização no cálculo da probabilidade de morte da população. Já o capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com o modelo aplicado. A primeira parte apresenta o projeto de experimentos realizado com os diversos parâmetros do modelo, o que possibilitou uma análise de sensibilidade do modelo diante da alteração dos valores dos parâmetros. A segunda parte traz as curvas de mortalidade geradas pelo modelo para as diversas populações consideradas e a comparação desses resultados com dados reais da população. Esse capítulo traz ainda a descrição do módulo *fuzzy* desenvolvido para estimar os parâmetros do modelo através dos indicadores de risco.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com este trabalho e as indicações de trabalhos futuros para a continuidade desta pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento do modelo de simulação proposto neste trabalho envolve conceitos de simulação dinâmica contínua e teorias de envelhecimento. Desta forma, este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados a esses temas, assim como trabalhos relacionados a eles na área de saúde.

Este capítulo apresenta uma breve revisão da modelagem e simulação de sistemas, focando principalmente nos sistemas dinâmicos contínuos explicando conceitos básicos da simulação dinâmica e as metodologias de modelagem mais conhecidas. Além disso, traz as principais teorias de envelhecimento e alguns modelos de simulação de envelhecimento.

2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

Um sistema é formado por um conjunto de elementos que se relacionam entre si constituindo a realização de um processo global que, geralmente, segue uma ordem, seja ela natural ou imposta, que apresenta diversas etapas e evolui ao longo do tempo (ACKOFF, 1971). Vários exemplos de sistemas podem ser citados, como, biológicos, ecológicos, econômicos, de transporte, de produção, entre outros.

Para fins de modelagem, todos esses sistemas podem ser classificados de acordo com seu comportamento temporal. A Figura 1 ilustra as diversas formas de classificação.

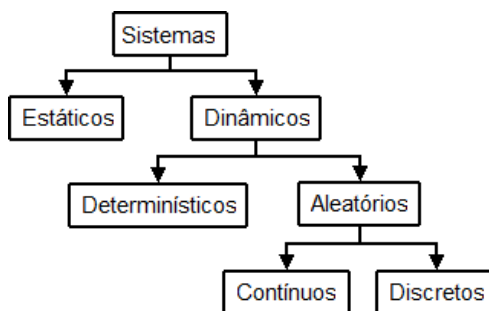


Figura 1 – Classificação dos sistemas (FREITAS FILHO, 2008).

Ao contrário dos sistemas estáticos, que não se alteram com o passar do tempo, as variáveis de estado que representam os sistemas dinâmicos se modificam na medida em que o tempo evolui. Dentre os sistemas classificados como dinâmicos é possível identificar aqueles que são determinísticos, cujas mudanças das variáveis são pré-determinadas, e os aleatórios, onde é possível apenas descrever os estados das variáveis, e não determiná-los previamente. Por fim, a descrição dos possíveis estados das variáveis pode ser caracterizada por comportamentos que se alteram em pontos discretos no tempo ou de forma contínua (FREITAS FILHO, 2008).

Devido a essas diferentes classificações, existem 2 formas de modelagem e simulação de sistemas que podem ser empregadas de acordo com a necessidade do problema: a modelagem e simulação de sistemas discretos e a modelagem e simulação de sistemas dinâmicos contínuos. Enquanto a simulação discreta é apropriada para os casos onde a mudança ocorre instantaneamente após a ocorrência de um evento, a simulação dinâmica contínua captura mudanças suaves que ocorrem gradualmente ao longo do tempo (THESEN; TRAVIS, 1989).

2.1.1 Modelagem e Simulação

Muitas vezes, simular o comportamento de um sistema é uma atividade interessante ou até mesmo necessária para auxiliar na avaliação da sua implementação real. Realizar experimentações com o sistema real pode não ser uma tarefa viável por uma série de motivos, por exemplo, o sistema real ainda não existe ou apresenta alto custo (não só financeiro), para implementar algum tipo de mudança ou atualização, envolve risco de vida. Características como essas fazem da modelagem e simulação de sistemas uma ferramenta importante no apoio à tomada de decisões (THESEN; TRAVIS, 1989).

A modelagem e simulação é uma técnica utilizada como forma de representação aproximada de sistemas reais onde o modelo serve para representar as partes envolvidas no processo e as relações quantitativas existentes entre elas (TAFPE, 1991).

Com a simulação é possível testar diversas hipóteses no modelo, controlar o tempo de modo que melhor reflita a realidade do sistema, utilizar métodos analíticos com mais facilidade, além de facilitar o entendimento do funcionamento do sistema e a influência de suas partes no sistema como um todo. Entretanto, existem algumas desvantagens relacionadas à simulação que podem inviabilizar o emprego da técnica

como, por exemplo, a necessidade de levar em consideração a qualificação do modelador que deve ser apto a modelar o sistema e realizar tarefas posteriores à modelagem, como testes e interpretação dos resultados. Além disso, o tempo necessário para realizar a modelagem e simulação pode ser muito maior do que o tempo disponível (FREITAS FILHO, 2008).

2.1.2 Modelagem Dinâmica Contínua

A Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*) é uma técnica de modelagem que fornece fundamento comum para ser aplicado a qualquer tipo de sistemas onde é necessário entender e influenciar a forma como as coisas mudam com o passar do tempo (FORRESTER, 1998). Classificada como uma técnica de modelagem para o aprendizado, auxilia no entendimento aprofundado do comportamento dos sistemas com o objetivo de identificar pontos problemáticos onde podem ser testadas diversas políticas (FORD, 1999).

Os primeiros trabalhos utilizando a Dinâmica de Sistemas surgiram após longa aplicação da técnica em problemas corporativos, administrativos e até urbanos (RADZICKI; TAYLOR, 1997) (FORRESTER, 1961) (FORRESTER, 1969). No entanto, a Dinâmica de Sistemas não fica restrita a esses tipos de sistemas, podendo ser aplicada em áreas como medicina, meio-ambiente, economia e política, pois combina a teoria, os métodos e a filosofia necessários para analisar o comportamento dos sistemas (FORRESTER, 1998).

Outro conceito importante relacionado a sistemas dinâmicos é o Pensamento Sistêmico (*Systems Thinking*), uma disciplina utilizada em teoria dos sistemas cujo objetivo é abranger todas as etapas de modelagem e entendimento de sistemas. O Pensamento Sistêmico define o processo de entendimento da complexidade de um determinado problema de diversas áreas de conhecimentos e, além de focar os mesmos tipos de sistemas da Dinâmica de Sistemas, também se utiliza de ciclos causais em sua modelagem (RICHMOND, 2004).

O Pensamento Sistêmico possui 3 componentes: o paradigma, que incorpora as tarefas de estudos e entendimento inicial dos sistemas antes da construção de um modelo, a linguagem, que representa os meios de expressar e apresentar, em termos visuais, o conhecimento adquirido sobre o sistema, e a metodologia, que é composta pelas ferramentas tecnológicas que dão suporte a todas as etapas da modelagem (MAANI; CAVANA, 2000).

O pensamento pode ser classificado em 4 níveis, conforme Figura 2. Localizados no topo da pirâmide, os eventos são a forma de pensamento mais superficial e se referem a fatos que ocorrem no dia-a-dia e que passam a ser conhecidos pelas pessoas. Representando um nível de conhecimento mais profundo, os padrões proporcionam uma visão mais abrangente do conhecimento, como o histórico de acontecimentos, por exemplo. As estruturas do sistema tem como objetivo entender como as coisas acontecem, explorando, principalmente, a identificação dos fatores que influenciam nos padrões. Por fim, na base da pirâmide, o modelo mental representa o nível mais aprofundado do pensamento, onde o objetivo é entender o porquê dos acontecimentos com base em crenças e valores (MAANI; CAVANA, 2000).

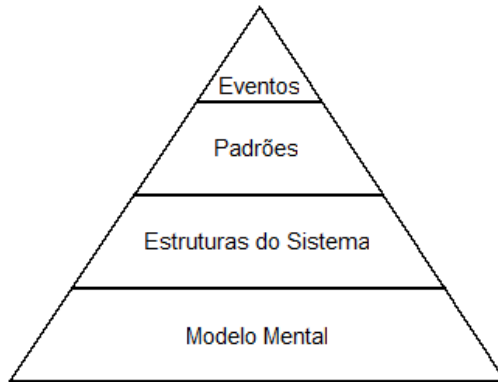


Figura 2 – Níveis de pensamento (MAANI; CAVANA, 2000).

Os modelos mentais, apesar de representar o nível mais avançado do pensamento, são intrínsecos a cada pessoa e por isso se revelam de diferentes formas quando são expostos. Devido a sua complexidade, sintetizar e realizar a dinâmica de todas as partes envolvidas no modelo tornam-se tarefas difíceis para o cérebro. Além disso, os modelos mentais normalmente possuem características como imprecisão, incompletude e raciocínios implícitos.

Graças a sua capacidade de representar o modelo e simular sua dinâmica, o objetivo da modelagem e simulação de sistemas dinâmicos é justamente representar os modelos mentais, possibilitando aos analistas e pesquisadores explicitar, testar e melhorar seus pensamentos (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

2.1.2.1 Blocos de Construção

De acordo com a Dinâmica de Sistemas, o modelo dinâmico de simulação é composto por 3 componentes (FORD, 1999):

- **Estoque:** também conhecido como nível, o estoque transmite a ideia de armazenamento, representando o acúmulo de entidades e o estado em que se encontra determinada variável ao longo do tempo. Por isso, são considerados os substantivos do modelo. Outra característica importante dos estoques é a memória, ou seja, o cálculo do próximo valor da variável no tempo depende do seu valor no tempo anterior. Além disso, os estoques podem influenciar os processos de mudanças de estados causando modificações na forma dos fluxos com o passar do tempo. Permitem, ainda, a separação de fluxos no modelo, apresentando fluxos de entrada e de saída que se comportam de maneira diferente, e possibilitam a criação de *delays*, representando estágios pelos quais as entidades permanecem por um tempo e depois passam (RADZICKI; TAYLOR, 1997).
- **Fluxos:** representam o processo pelo qual as entidades passam, tanto para entrar nos estoques quando para sair deles, proporcionando a sua transformação. No modelo, os fluxos representam os verbos e trabalham por meio de taxas de mudanças, sendo considerados uma atividade ou um movimento que contribui para a mudança em um estoque por unidade de tempo (ROBERTS et al., 1994).
- **Conversores:** auxiliam os fluxos no processo de transformação dos estoques representando determinados valores de taxas de mudanças, constantes e cálculos em geral. Por atuarem junto aos fluxos, os conversores são considerados os advérbios do modelo, quantificando as mudanças que ocorrem nos fluxos e estoques por unidade de tempo (RICHMOND, 2004). Embora o próprio fluxo seja capaz de representar todos os valores e cálculos do modelo, a função principal dos conversores é facilitar seu entendimento, tornando mais claro o envolvimento de todos os componentes responsáveis pelos cálculos dos fluxos (RADZICKI; TAYLOR, 1997).

Juntos, esses 3 componentes representam a estrutura básica de um modelo de simulação dinâmica, também chamado de diagrama de fluxo, que pode ser visualizado na Figura 3. A nuvem existente em

uma das extremidades do fluxo significa que as entidades que passam pelo fluxo possuem uma origem desconhecida. Outro detalhe é a ligação entre o conversor e o fluxo, realizada por meio de uma seta denominada conector que representa as relações extras existentes no modelo.

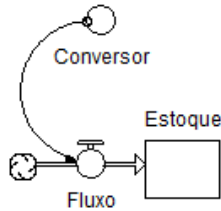


Figura 3 – Diagrama de fluxo.

2.1.2.2 Padrões Estruturais

De acordo com a definição de sistemas, as entidades se relacionam executando um processo e, muitas vezes, os resultados intermediários gerados nesse processo causam influência em outras partes do sistema. Quando essa influência reflete nas variáveis de entrada existe a ocorrência de um ciclo (RADZICKI; TAYLOR, 1997).

A relação de causa e efeito que une as variáveis, propagando sinais por uma cadeia de relações causais até afetar a si próprio, é chamado de ciclo de retroalimentação (*feedback loop*), que podem ser classificados como positivos ou negativos dependendo da influência que as variáveis causam umas nas outras ao longo do ciclo (MARTIN, 1997).

Um ciclo é chamado positivo quando as variáveis interligadas variam no mesmo sentido, ou seja, o aumento de uma causa o aumento da outra ou a diminuição de uma causa a diminuição da outra. Esse tipo de ciclo é relacionado ao crescimento desenfreado dos sistemas que pode ser descrito por um crescimento exponencial. Esse comportamento é considerado típico de aplicações financeiras e de epidemias (ASHFORD, 1995). Na modelagem do diagrama de fluxos, o ciclo positivo ocorre quando a taxa que rege a mudança do estoque é dependente do próprio estoque.

Quando as variáveis interligadas variam em sentido oposto, o ciclo é denominado negativo. Ou seja, o aumento de uma variável causa a diminuição da outra, ou vice versa. O efeito de um ciclo negativo

ameniza as mudanças ocorridas no sistema e sua tendência é manter o sistema regulado, sob controle. Em outras palavras, é o ciclo negativo que mantém o sistema em equilíbrio (MARTIN, 1997).

A Figura 4 apresenta a forma gráfica de representação dos ciclos de retroalimentação, o diagrama de ciclo causal. Gráficamente, o sinal de adição representa os ciclos positivos enquanto o sinal de subtração representa os negativos.

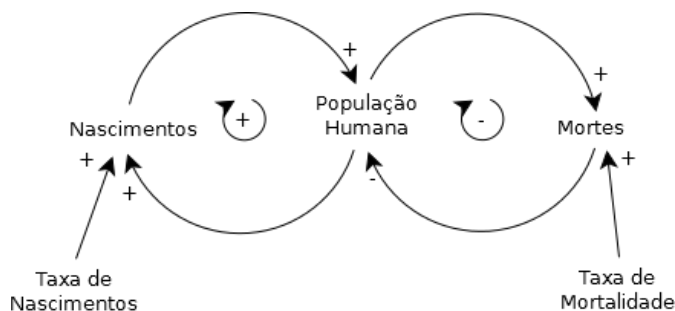


Figura 4 – Diagrama de ciclo (FORD, 1999).

A Figura 4 ilustra um processo de crescimento de uma população que, por um lado, é aumentada pelos nascimentos, e, por outro, é diminuída pelas mortes. Neste exemplo, o número de nascimentos depende do tamanho da população e da taxa de nascimento. Quanto maior a taxa e a população, maior é o número de nascimentos aumentando o tamanho da população. Esse processo constitui o ciclo positivo que, por si só, faria a população crescer desordenadamente. O número de mortes, por sua vez, depende do tamanho da população e da taxa de mortalidade. Quanto maior a taxa e a população, maior o número de mortes diminuindo o tamanho da população. Desta forma, esse ciclo negativo constitui uma estrutura reguladora que impede que a população cresça desenfreadamente.

A Figura 5 apresenta o diagrama de fluxo equivalente ao diagrama de ciclo da Figura 4. A população é entendida como um estoque, já que é essa variável que acumula entidades no decorrer da simulação. Os nascimentos e as mortes são fluxos que representam os processos pelos quais a população passa, enquanto os conversores quantificam o andamento desses processos, juntamente com a própria população.

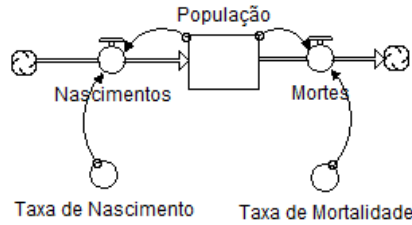


Figura 5 – Diagrama de fluxo de uma população (FORD, 1999).

2.1.2.3 Padrões Comportamentais

As variáveis envolvidas em um sistema apresentam diferentes tipos de comportamento temporal cujo entendimento constitui um passo importante para que a análise e construção de um modelo dinâmico contínuo seja feita de forma adequada (RADZICKI; TAYLOR, 1997). Esses comportamentos estão implícitos nos padrões estruturais apresentados na seção anterior (seção 2.1.2.2) e são descritos detalhadamente a seguir.

PADRÃO LINEAR Para que um estoque tenha comportamento linear é necessário que as taxas de mudanças associadas a ele sejam fixas e que o resultado da soma de todos os fluxos de entrada menos todos os fluxos de saída seja um valor constante. De acordo com esse resultado, o comportamento da variável que apresenta padrão linear pode ser classificado como constante, crescente ou decrescente.

Quando esse valor é zero, significa que não há mudanças na variável, indicando uma situação de equilíbrio. Nesse caso, o comportamento é classificado como padrão linear constante. Se o valor é positivo, trata-se de um comportamento com padrão linear crescente, enquanto que se o valor é negativo, o padrão é linear decrescente (RADZICKI; TAYLOR, 1997). A Figura 6 ilustra os 3 tipos de comportamento de padrão linear.

Uma característica importante das variáveis que apresentam padrão linear é que, quando esse comportamento é identificado no modelo significa que não existem ciclos de retroalimentação relacionados a essa variável. Um exemplo prático desse tipo de comportamento pode ser observado em modelos de gerenciamento de recursos onde as entradas e as saídas são constantes (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

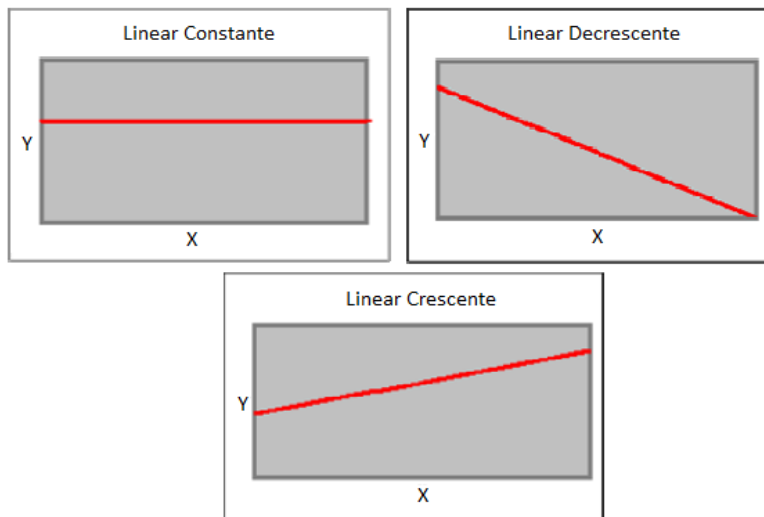


Figura 6 – Padrões lineares de comportamento.

PADRÃO EXPONENCIAL Esse tipo de comportamento é caracterizado pelo crescimento ou decrescimento exponencial e é considerado comum nos sistemas dinâmicos. Nele, as mudanças observadas nos estoques são proporcionais aos próprios estoques. Ciclos de retroalimentação positivos são associados ao crescimento exponencial, enquanto ciclos negativos estão relacionados ao decrescimento (RADZICKI; TAYLOR, 1997).

A Figura 7 apresenta os padrões exponenciais de comportamento. Normalmente, esse tipo de comportamento pode ser observado em sistemas de dinâmicas populacionais, de transferência de calor e de mecânica de fluidos (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

GOAL SEEKING O comportamento com padrão *goal seeking* é muito parecido com o de padrão exponencial, exceto pelo fato de que existe um valor a ser alcançado, caracterizando um comportamento assintótico. Esse valor é o que mantém a variável em um estado de equilíbrio que é ocasionado por um ciclo de retroalimentação negativo (MARTIN, 1997). A Figura 8 ilustra esse padrão de comportamento com crescimento e decrescimento.

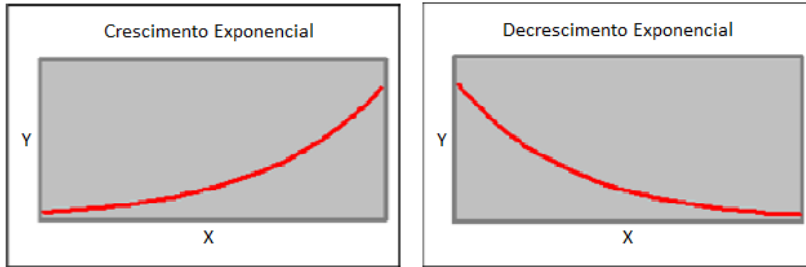


Figura 7 – Padrões exponenciais de comportamento.

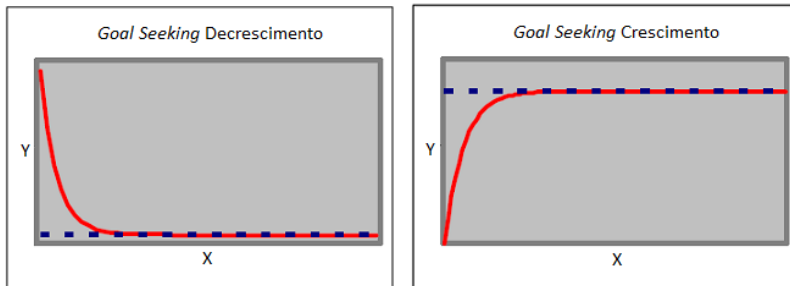


Figura 8 – Padrões *goal seeking* de comportamento.

OSCILAÇÃO O padrão oscilação de comportamento pode ser considerado o mais comum em sistemas dinâmicos. Uma oscilação identificada no modelo indica que existe um ciclo de retroalimentação negativo que força a variável a mudar em torno de um conjunto de condições (RADZICKI; TAYLOR, 1997).

Esse padrão possui vários subtipos associados:

- Amortecido: os valores, inicialmente altos, sofrem uma suavização com o passar do tempo.
- Sustentado: os valores seguem movimentos iguais ao longo do tempo.
- Explosão: os valores se comportam de maneira mais suave no início e vão se tornando maiores a cada período.

- Caos: não existe padrão definido para os dados, que não seguem e não repetem períodos.

A Figura 9 apresenta os 4 subtipos de oscilação, que podem ser identificadas com frequência em sistemas de presa e predador e com consumidores e recursos renováveis (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

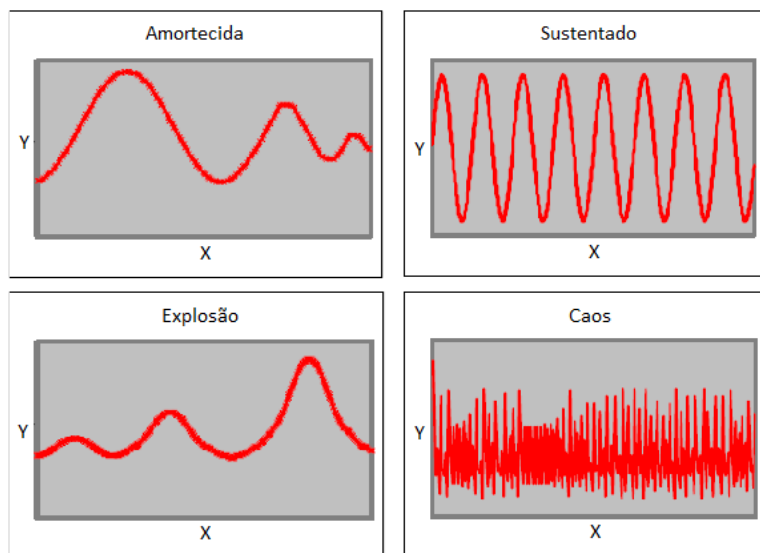


Figura 9 – Padrões oscilação de comportamento.

S-SHAPED Esse padrão é uma combinação dos comportamentos exponencial e *goal seeking*. O padrão *s-shaped* começa com um crescimento exponencial que segue até um determinado ponto, denominado ponto de inflexão. A partir daí, a variável passa a assumir um crescimento assintótico, para depois entrar em uma situação de equilíbrio (RADZICKI; TAYLOR, 1997).

O crescimento exponencial ocorre devido a um ciclo de retroalimentação positivo que perde a força no momento em que um ciclo negativo passa a dominar a situação, causando o crescimento assintótico e posterior equilíbrio. O equilíbrio é atingido quando o sistema atinge a capacidade suportada, chamada de capacidade de carga (GLICK; DUHON, 1994).

A Figura 10 ilustra esse padrão de comportamento, que pode ser identificado em sistemas populacionais com recursos limitados e sistemas de epidemiologia (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

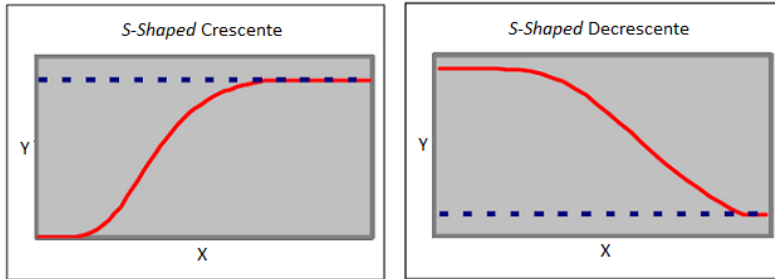


Figura 10 – Padrões *s-shaped* de comportamento.

2.1.3 Metodologia de Construção dos Modelos de Sistemas Dinâmicos

Para que um modelo de simulação seja consistente, o processo de modelagem é fundamental e merece atenção especial, podendo tornar essa etapa do desenvolvimento mais importante que o próprio modelo (RADZICKI; TAYLOR, 1997). As metodologias existentes para modelagem de sistemas dinâmicos contínuos são bastante parecidas e duas delas, consideradas principais, são as mais conhecidas: a abordagem adotada por pesquisadores do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) (FORRESTER, 1994) e a abordagem sistêmica (MAANI; CAVANA, 2000).

A diferença básica entre as duas propostas está na obrigatoriedade e no momento da construção do diagrama de ciclo. Enquanto na abordagem sistêmica a construção do diagrama de ciclo é obrigatória e deve ser realizada antes da construção do diagrama de fluxo, na outra abordagem o diagrama de ciclo é opcional e, se necessário, é construído após o diagrama de fluxo. Essa diferença é motivada pela impossibilidade de identificar claramente a relação entre os estoques e os fluxos apenas observando as relações positivas e negativas do diagrama de ciclo. Somente um diagrama de fluxo possibilita saber, por exemplo, se o comportamento de um estoque é linear ou exponencial (RICHARDSON, 1986).

A Figura 11 apresenta os passos da metodologia sistêmica. A primeira fase, estruturação do problema, consiste em identificar o problema a ser tratado por meio de coleta de dados e informações iniciais. A seguir, a modelagem do ciclo causal abrange a identificação das principais variáveis do problema e seus padrões de comportamento e o desenho das relações existentes entre elas. O terceiro passo é realizar a modelagem dinâmica criando as equações matemáticas do modelo. Depois disso, a etapa de planejamento e modelagem do cenário envolve atividades como planejamento de testes e testes de políticas. Para isso é necessário conhecer a fundo os fatores que mais influenciam no modelo e afetam as respostas. Neste momento cabe também avaliar o desempenho das políticas e estratégias adotadas. Por último, a fase de implementação e laboratório de aprendizagem consiste em fazer uso de interfaces amigáveis facilitando as experimentações (MAANI; CAVANA, 2000).

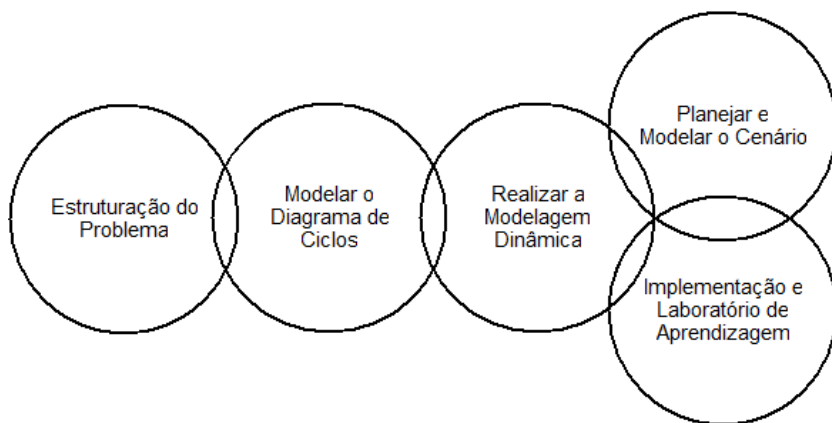


Figura 11 – Fases da metodologia sistêmica (MAANI; CAVANA, 2000).

2.2 TRATAMENTO DA INCERTEZA

O aperfeiçoamento da simulação utilizando técnicas de IA (Inteligência Artificial) já vem sendo investigado há algum tempo. As técnicas de IA podem ser utilizadas em vários passos da simulação, desde o desenvolvimento do modelo até a visualização, explicação e interpretação dos resultados. Entretanto, a realização da simulação

requer que o modelo contenha os dados numéricos necessários para a representação do comportamento do sistema real. E isso nem sempre é possível. Muitas vezes, certos parâmetros não são conhecidos, são conhecidos parcialmente ou de forma qualitativa.

Na lógica clássica, as variáveis envolvidas em um determinado problema possuem valores determinados com precisão como, por exemplo, verdadeiro ou falso. Essa característica também é evidenciada na teoria clássica dos conjuntos através da classificação de um elemento como pertencente ou não a um determinado conjunto. Porém, muitas informações, classificadas como qualitativas, carregam indefinição nos limites de valor de veracidade de uma variável, tornando inviável a utilização de métodos clássicos em sua modelagem. Métodos não-clássicos de modelagem surgiram dessa necessidade de incorporar características observadas para a resolução de problemas cujas técnicas clássicas não conseguem contemplar.

A escolha da técnica de modelagem a ser utilizada depende da condição da informação com a qual se está trabalhando e do tipo do problema a ser resolvido. A Figura 12 apresenta um modelo hierárquico de ignorância que aborda alguns dos problemas apresentados pelas informações quando da modelagem de um sistema (AYYUB, 2001).

A origem do problema parte da ignorância de alguma informação, ou seja, da ausência de conhecimento a respeito de algo. Essa ignorância pode ser classificada em dois tipos: a ignorância cega e a ignorância consciente.

A ignorância cega é a ignorância da própria ignorância, ou seja, quando o indivíduo não tem consciência de que não tem informação. Esse tipo de ignorância inclui conceitos de conhecimento ilusório, classificado como falácia; de conhecimento incognoscível, que não pode ser obtido; e de irrelevância, que ainda pode ser dividida em não atualidade, tabu e indecidibilidade.

A ignorância consciente se refere à ignorância reconhecida, quando o indivíduo tem consciência de que não tem informação. Esse tipo de ignorância envolve conceitos de inconsistência e incompletude. A inconsistência é definida pela informação distorcida como resultado de confusão, conflito ou imprecisão. Já a incompletude consiste do conhecimento incompleto originado pela ausência de conhecimento, pela existência de incógnitas e pela incerteza da informação.

A incerteza é criada pelas deficiências inerentes à aquisição do conhecimento. A incerteza classificada como aproximação ocorre quando são realizadas aproximações no desenvolvimento do conhecimento por meio de redução e generalização. Esse processo pode gerar informações

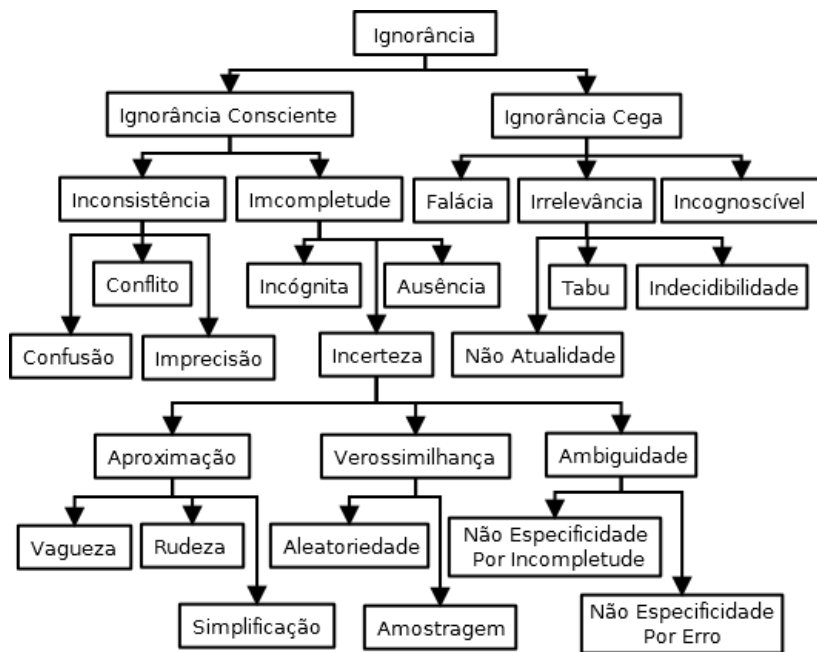


Figura 12 – Modelo hierárquico de ignorância (AYYUB, 2001).

vagas, rudes ou simplificadas, que são classificadas, respectivamente, como vagueza, rudeza e simplificação.

A incerteza classificada como verossimilhança pode ser definida no contexto de chances e possibilidades e envolve conceitos de aleatoriedade e amostragem.

Já a incerteza classificada como ambiguidade ocorre da possibilidade de haver múltiplas saídas para um processo. O fato de reconhecer alguma das saídas possíveis cria a incerteza definida como não especificidade por incompletude, uma vez que a saída reconhecida pode constituir apenas uma lista parcial de todas as saídas possíveis. Já a definição incorreta das saídas é chamada de não especificidade por erro.

Ainda de acordo com (AYYUB, 2001), alguns modelos são mais adequados para tratamento de determinados tipos de incerteza do que outros. A teoria dos conjuntos clássicos lida efetivamente com ambiguidade, modelando as não especificidades. Já os conjuntos *fuzzy* e os *rough sets* podem ser usados para modelar a vagueza, a rudeza e a simplificação. As teorias de probabilidade e estatística são comumente

utilizadas para modelar as incertezas caracterizadas por aleatoriedade e amostragem, enquanto os métodos bayesianos podem ser utilizados para combinar aleatoriedade e amostragem com informações subjetivas, consideradas uma forma de simplificação.

A utilização da simulação dinâmica juntamente com técnicas de IA especificamente na área médica e de saúde caracteriza um esforço válido, uma vez que se trata de um domínio repleto de incertezas e conceitos qualitativos. Esse esforço viabiliza a análise de cenários futuros e aplicação de políticas necessárias para a amenização de determinados problemas. O próprio diagnóstico pode ser citado como exemplo de atividade que envolve muitas incertezas, e por vários motivos: a manifestação das doenças pode ser diferente em pessoas diferentes; pessoas que possuem um mesmo sintoma podem não possuir a mesma doença (uma vez que um sintoma pode indicar várias doenças). Além disso, ainda existe a dificuldade de encontrar funções matemáticas capazes de descrever as variáveis envolvidas no problema. Por isso, a maioria dos modelos da área é descrita através da experiência de um especialista.

2.2.1 Modelagem Fuzzy

A teoria dos conjuntos *fuzzy*, elaborada por (ZADEH, 1965), propõe que os elementos não precisam pertencer inteiramente a determinado conjunto, como na teoria clássica de conjuntos. Enquanto os conjuntos clássicos contêm objetos que satisfazem propriedades precisas de pertinência, os conjuntos *fuzzy* contêm objetos que satisfazem propriedades imprecisas, ou seja, a pertinência de um elemento a um conjunto *fuzzy* pode ser aproximada.

Se existir uma compilação exhaustiva de elementos individuais x , que compõem um universo X e várias combinações desses elementos formando um conjunto chamado A sobre o universo, na teoria clássica de conjuntos, esse elemento é ou não membro do conjunto A . Essa representação binária de pertinência pode ser representada, matematicamente, pela função 2.1, onde o símbolo $\chi_A(x)$ indica uma pertinência inequívoca do elemento x ao conjunto A , e os símbolos \in e \notin denotam pertence e não pertence, respectivamente (ROSS, 2004).

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (2.1)$$

(ZADEH, 1965) estendeu essa noção de associação binária de

forma a possibilitar vários graus de pertinência em um intervalo contínuo real $[0, 1]$, onde as extremidades 0 e 1 representam, respectivamente, nenhuma pertinência e pertinência total (mesmo conceito dos conjuntos clássicos). Porém, o número infinito de valores entre esses pontos pode representar vários graus de pertinência para o elemento x em algum conjunto no universo. Esses conjuntos do universo X capazes de tratar graus de pertinência são denominados conjuntos *fuzzy*. Neste caso, o mapeamento dos elementos do universo nos conjuntos *fuzzy* é representado pela equação 2.2, onde $\mu_A(x)$ corresponde ao grau de pertinência do elemento x ao conjunto *fuzzy* A (KLIR; YUAN, 1995).

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (2.2)$$

A diferença fundamental entre os conjuntos clássicos e os conjuntos *fuzzy* é justamente a função de pertinência. Enquanto o conjunto clássico tem uma função de pertinência exclusiva, o conjunto *fuzzy* pode ter um número infinito de funções de pertinência para representá-lo.

Um sistema de inferência *fuzzy* compreende as etapas de fuzzificação, inferência e desfuzzificação. Na etapa de fuzzificação, as entradas, compostas por valores numéricos convencionais, também denominados *crisp*, passam pelo mapeamento dos elementos para a função de pertinência dos conjuntos *fuzzy* definidos *a priori*. Os valores numéricos dos elementos de um universo estão em um intervalo denominado suporte e a classificação dos elementos nos conjuntos é realizada com base no conceito de grau de pertinência citado anteriormente.

As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* podem ter várias formas de representação como, por exemplo, triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoidal, ilustradas na Figura 13. Na modelagem, a determinação da função de pertinência dos conjuntos *fuzzy* que compõem uma variável depende do problema que está sendo analisado. Assim, conjuntos que representam a mesma ideia podem ser representados de maneiras muito diferentes em contextos diferentes.

Após a fuzzificação, os valores passam pela máquina de inferência, que realiza as ativações de todas as regras paralelamente. Os sistemas especialistas modelados por meio de inferência *fuzzy* fazem uso de regras do tipo SE-ENTÃO. Em sistemas convencionais, o raciocínio é feito com base nos valores lógicos verdadeiro e falso dos antecedentes e consequentes das regras. No caso dos sistemas *fuzzy*, o antecedente da regra representa um grau de pertinência e o consequente representa um novo conjunto *fuzzy*.

Como exemplo desse processo, sejam A e B dois conjuntos *fuzzy* definidos sobre os universos X e Y , respectivamente, a regra *SE* A

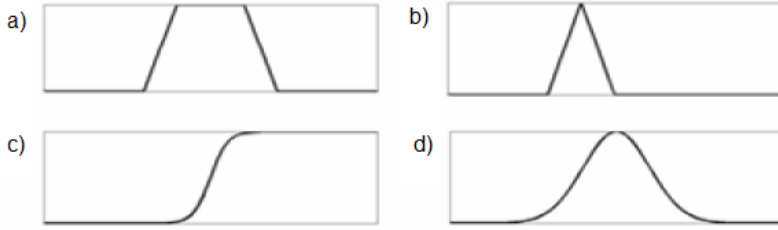


Figura 13 – Exemplos de funções de pertinência: (a) trapezoidal, (b) triangular, (c) sigmoide e (d) gaussiana.

ENTÃO B pode ser definida conforme equação 2.3 a seguir:

$$A \rightarrow B = (A \times B) \bigcup (\bar{A} \times B) = R \quad (2.3)$$

Na equação 2.3, o conjunto A caracteriza a entrada e o conjunto B a saída, enquanto R representa a relação entre esses conjuntos. Dessa forma, toda regra gera como saída um conjunto *fuzzy* e, ao final, todas as saídas devem ser agregadas para formar o conjunto resultante, conforme ilustrado na Figura 14.

Assim como na lógica clássica, a lógica *fuzzy* também apresenta algumas operações. Dados dois conjuntos *fuzzy* A e B definidos sobre um universo X , para $x \in X$:

- Intersecção ou T-Norma:

$$(A \cap B)(x) = \min[A(x), B(x)] \quad (2.4)$$

- União ou T-Conorma:

$$(A \cup B)(x) = \max[A(x), B(x)] \quad (2.5)$$

- Complemento:

$$\bar{A}(x) = 1 - A(x) \quad (2.6)$$

É importante salientar que a forma como operações apresentadas nas equações em 2.4, 2.5 e 2.6 são consideradas como formas padrão de execução. No entanto, a teoria de conjuntos *fuzzy* possui ainda outras maneiras para realização dessas mesmas operações.

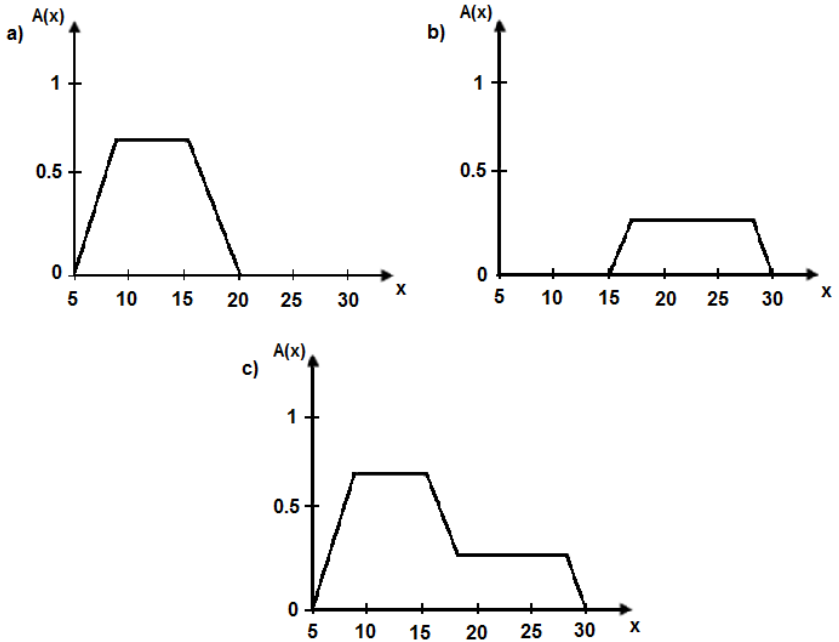


Figura 14 – Exemplo de saída de processo fuzzy: (a) primeira parte da saída fuzzy, (b) segunda parte da saída fuzzy e (c) união das duas partes.

Se for necessário, o conjunto de saída da máquina de inferência pode ser desfuzzificado para se tornar novamente um valor numérico convencional. Entre os métodos de desfuzzificação existentes, podemos citar como exemplo o método centróide, que tem como resultado o centro da área do conjunto *fuzzy* de saída, a média dos máximos, que resulta na média entre os elementos com o maior grau de pertinência do conjunto final, e o maior e o menor dos máximos, que apresenta como resultado, respectivamente, o maior e menor elemento entre os que possuem o maior grau de pertinência. Esses exemplos podem ser observados na Figura 15.

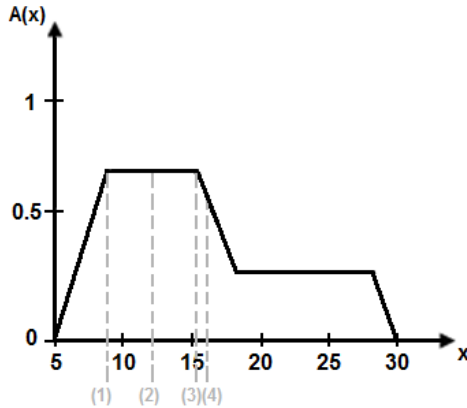


Figura 15 – Exemplo de métodos de desfuzzificação: (1) menor dos máximos, (2) média dos máximos, (3) maior dos máximos e (4) centróide.

2.2.1.1 Aplicações de Simulação Dinâmica *Fuzzy*

São vários os trabalhos existentes que utilizam simulação dinâmica contínua e teoria *fuzzy* aplicadas a diversas áreas de conhecimento, relacionando assuntos que vão desde o processo de desenvolvimento de software até o estudo da dinâmica populacional. Alguns trabalhos realizam a agregação de ferramentas de simulação com sistemas especialistas *fuzzy*, enquanto outros utilizam sistemas *fuzzy* para modelar a representação do dinamismo do sistema, o que acaba não considerando a transformação contínua das variáveis de estado.

No contexto do processo de desenvolvimento de software, (LEVARY; LIN, 1991) apresenta um modelo dinâmico conectado a dois sistemas especialistas *fuzzy* que realizam o tratamento das entradas e das saídas do simulador. O objetivo deste trabalho é utilizar a simulação dinâmica para compreender todas as atividades envolvidas no processo, que além de possuir muitas etapas, são caracterizadas por vagueza e imprecisão.

No âmbito de sistemas relacionados à ecologia, (KARAVEZYRIS; TIMPE; MARZI, 2002) produziram um sistema dinâmico para compreender o futuro do lixo sólido produzido na cidade de Berlim. A base de regras utilizada para o tratamento das informações imprecisas leva

em consideração informações como desenvolvimento demográfico, instalações e despesas de recuperação de materiais, tratamento e esquemas de disposição, atividades de produção, comportamento ambiental e mudanças de leis para auxiliar no planejamento e na tomada de decisões com relação ao gerenciamento do lixo produzido.

Outro trabalho na área da ecologia é a proposta híbrida de um modelo dinâmico contínuo com raciocínio *fuzzy* para simulação de políticas fiscais para redução de CO₂ nos domicílios (KUNSCH; SPRINGAEL, 2008). O objetivo deste modelo é simular o comportamento dos consumidores perante políticas fiscais adotadas utilizando o raciocínio *fuzzy* para tratar de parâmetros dinâmicos vindos de diferentes bases de dados com diferentes níveis de credibilidade.

(CECCONELLO, 2006) desenvolveu um controlador *fuzzy* para representação de dinâmica populacional com presença de incerteza. O sistema, denominado p-*fuzzy*, é responsável pela evolução do sistema através de um conjunto de regras cujo objetivo é utilizar as mesmas informações que um conjunto de equações diferenciais utilizaria. Essa forma de modelagem dispensa o conhecimento aprofundado das relações existentes entre as variáveis e suas variações.

(GHAZANFARI; ALIZADEH; JAFARI, 2002) abordaram os próprios passos da metodologia *System Dynamics* com o intuito de aprimorar o entendimento dos diagramas de ciclos causais. Para isso, utilizaram um sistema especialista e um grafo *fuzzy* para atribuir termos qualitativos como “alto”, “baixo” e “pouco” aos rótulos “positivo” e “negativo” utilizados nos diagramas.

Com o objetivo estudar a dinâmica da raiva canina no estado de São Paulo, (ORTEGA; SALLUM; MASSAD, 2000) construíram um sistema *fuzzy* com uma base de regras aplicada iterativamente. Assim, a saída de uma dada simulação das regras era a entrada para a próxima. Este trabalho, no entanto, se enquadra no que se poderia chamar de sistema dinâmico de tempo discreto, pois não está analisando as variáveis continuamente ao longo do tempo. Mais tarde, os autores buscaram uma forma adequada de auxiliar o especialista na construção da base de regras utilizando o princípio da extensão (ORTEGA; BARROS; MASSAD, 2003). Em ambos os trabalhos os resultados foram condizentes com os dados reais.

O problema do dinamismo da AIDS com presença de incerteza foi tratado por (JAFELICE, 2003) em um modelo que busca acompanhar a dinâmica do vírus no que se refere a transição da infecção assintomática para sintomática utilizando equações diferenciais ordinárias com um parâmetro *fuzzy* para representar a taxa de mudança de um estado

para outro, que depende de aspectos como a carga viral e as células de defesa do organismo.

A modelagem do sistema nervoso central foi o tema da pesquisa de (NEBOT et al., 2003). Considerando que o sistema nervoso central não possui funções matemáticas que o definem precisamente e envolve questões que não são conhecidas em sua totalidade, este trabalho apresenta uma modelagem que utiliza um sistema especialista *fuzzy* com o objetivo é alcançar um modelo genérico que possa ser usado para pacientes com características comuns.

O tabagismo também foi alvo de estudos fazendo uso de ferramentas específicas para simulação contínua. (AHMAD, 2005) e (AHMAD; FRANZ, 2008) se concentraram em avaliar a dinâmica das pessoas em relação ao uso do cigarro. O modelo formulado tem como objetivo simular o impacto econômico e na saúde diante do aumento dos impostos sobre o cigarro. Os resultados, validados a partir de dados provenientes de bases públicas, demonstraram que é possível reduzir o número de fumantes a partir desta medida e, consequentemente, melhorar a saúde dessas pessoas, gerando, inclusive, economia em gastos com a saúde. Este modelo, entretanto, não levou em consideração possíveis incertezas presentes no modelo.

2.3 TEORIAS E MODELOS DE ENVELHECIMENTO

O envelhecimento consiste em uma transformação natural que resulta na perda fisiológica e funcional de indivíduos de uma espécie. Não considerado doença, esse processo tem início logo após a maturação sexual e se estende até a longevidade máxima do indivíduo e as perdas decorrentes desse processo causam o aumento da probabilidade de morte do indivíduo em um ambiente considerado normal (HAYFLICK, 1997).

As doenças associadas à velhice, como por exemplo câncer, doenças cardíacas e mal de *Alzheimer*, não são parte desse processo natural. Embora as perdas funcionais que ocorrem com o envelhecimento sejam normais, elas aumentam a vulnerabilidade do indivíduo a doenças e até mesmo acidentes. Com o passar do tempo, por exemplo, nosso sistema imunológico perde, gradativamente, sua eficiência no combate às doenças, o que aumenta a probabilidade de erros na defesa do organismo e, consequentemente, a probabilidade de morte (STREHLER; MILDVAN, 1960).

2.3.1 Teorias de Envelhecimento

Compreender o processo biológico de envelhecimento tem sido foco de estudos há muito tempo. No início, as ideias sobre o envelhecimento eram puramente especulativas, mas com o passar do tempo e o aperfeiçoamento dos métodos científicos foi possível obter observações suficientes para formular e sustentar várias teorias acerca desse processo (STREHLER, 2000).

As teorias do envelhecimento podem ser divididas em dois grupos: (1) as teorias baseadas em eventos propositaís, que consideram a existência de um futuro programado determinado por um relógio biológico que se baseia em eventos químicos e mudanças físicas, e (2) aquelas baseadas em eventos aleatórios, que defende que o processo de envelhecimento é influenciado por eventos causais não programados (HAYFLICK, 1997). Algumas dessas teorias são citadas a seguir.

TEORIAS BASEADAS EM EVENTOS PROPOSITAIS

- Teoria da substância vital: essa teoria propõe a existência de uma substância vital que age desde o nascimento do indivíduo e perde intensidade no decorrer da vida. Existem várias formas de interpretar o que significa a substância vital como, por exemplo, o número de batimentos cardíacos, o DNA dos genes, entre outros.
- Teoria da exaustão reprodutiva: não considerada uma teoria universal por não se aplicar a todos os seres vivos, a teoria da exaustão reprodutiva considera que após o período de reprodução os seres logo envelhecem e morrem.
- Teoria da mutação genética: essa teoria associa o envelhecimento a mutações nos genes que podem trazer tanto benefícios quanto prejuízos para o indivíduo.

TEORIAS BASEADAS EM EVENTOS ALEATÓRIOS

- Teoria do acúmulo de resíduos: essa teoria sugere que, no decorrer da vida, as células são acometidas por substâncias prejudiciais que, quando não eliminadas pelo organismo, são acumuladas causando o envelhecimento.
- Teoria dos erros e reparos: a teoria dos erros e reparos considera o organismo como uma máquina que dispõem de vida útil e que,

eventualmente, necessita de reparos. Com o tempo, esses reparos não são mais suficientes para garantir o perfeito funcionamento do conjunto e, quando não é mais possível reparar os danos, a máquina para.

- Teoria do desgaste: essa teoria parte do princípio de que o desgaste diário se acumula no organismo, que não tem capacidade de renovação infinita. Entretanto, o problema identificado nessa suposição depende da medição do desgaste, que não possui métricas definidas.
- Teoria do sistema imunológico: essa teoria sustenta que o sistema imunológico é o grande responsável pela queda funcional e consequente envelhecimento porque, com o passar do tempo, ele se torna menos eficaz, permitindo até mesmo a autodestruição.
- Teoria do ritmo de vida: essa teoria considera que, ao nascer, o indivíduo possui uma quantidade de energia que é diminuída de acordo com o ritmo de vida. Quanto mais rapidamente essa energia é consumida, mais rápido é o envelhecimento.

Entretanto, essas teorias não podem ser consideradas totalmente corretas ou incorretas pois, além da complexidade que envolve todos aspectos relevantes acerca do envelhecimento, a falta de experimentação é um problema inerente a elaboração dessas teorias. Isso torna muito difícil encontrar um conjunto que defina tanto os elementos envolvidos no processo de envelhecimento quanto o modo de evolução desses acontecimentos ao longo da vida de um indivíduo (HARGROVE, 1998).

2.3.2 Mortalidade e Riscos

Desde que os seres humanos constataram que o envelhecimento reduz seu vigor e anuncia a aproximação da morte, muitos esforços foram despendidos na tentativa de controlar esse processo. A busca por uma substância com propriedades rejuvenescedoras, o desenvolvimento da alquimia e da terapia celular, o consumo de iogurte e a esterilização são apenas alguns dos exemplos que constituem as lendas e mitos sobre a reversão do processo de envelhecimento (HAYFLICK, 1997).

Apesar disso, os modernos avanços científicos indicam que a forma mais direta de aumentar a expectativa de vida dos indivíduos é retardar ou eliminar causas de morte. Um exemplo disso é que em 1900 as principais causas de morte eram as doenças infecciosas e sua

quase eliminação resultou em um ganho de 25 anos na expectativa de vida da população (STREHLER, 2000). Eliminar uma causa de morte, entretanto, pode não ser uma tarefa muito fácil. Por isso, as tentativas de reduzir a gravidade ou incidência de uma doença ou adiar sua ocorrência concentram-se normalmente em mudanças no estilo de vida.

Sob o ponto de vista estatístico, o conceito de risco para a saúde é definido como a probabilidade do indivíduo morrer ou sofrer de uma doença específica durante um intervalo de tempo determinado. Embora não seja possível dizer quem vai morrer, é possível estimar níveis de risco associados a comportamentos ou condições particulares através correlações entre as características de interesse e a incidência de doenças ou mortes na população. Essas características são chamadas de indicadores de risco ou características prognósticas e o fator de risco é o peso quantitativo atribuído ao indicador para descrever em quanto ele aumenta ou diminui o risco do indivíduo adoecer ou morrer de uma causa em particular (GOETZ; DUFF; BERNSTEIN, 1980).

Os fatores de risco estão relacionados a praticamente todas as causas de morte e os hábitos de vida afetam diretamente o nível de risco para a ocorrência dessas doenças (KANNEL, 1990). Embora alguns fatores sejam não modificáveis, como predisposição genética, sexo, e idade avançada, existem fatores que são considerados flexíveis, como tabagismo, excesso de peso, consumo de álcool e prática de exercícios (KANNEL, 1993). Mudanças apropriadas desses fatores podem tanto evitar quanto reverter condições como hipertensão, colesterol e diabetes, tornando possível salvar vidas através da redução desses fatores (HOEGER, 1987).

Considerando cada um dos fatores de risco, as tabelas de sobrevivência apresentam o risco médio para todos os membros de uma população. Desenvolvidas inicialmente por Harvey Geller, essas tabelas expressam a expectativa de morte nos próximos 10 anos para uma população de 100.000 pessoas e trazem as taxas de mortalidade para todas as causas combinadas e para cada uma das principais causas, agrupadas por raça, sexo e faixa etária (CENTER FOR HEALTH PROMOTION AND EDUCATION (U.S.), 1982).

Para obter uma expressão de risco ajustada para uma causa de morte em particular os valores das tabelas de mortalidade são multiplicados pelo fator de risco composto, que é calculado a partir da combinação dos fatores de risco aplicáveis a causa determinada (RAINES; ELLIS, 1982). Interações entre fatores de riscos podem causar um grau muito mais alto ou mesmo diminuir o risco de incidência da doença.

2.3.3 Modelos de Simulação de Envelhecimento

Apesar da grande quantidade de teorias acerca do processo de envelhecimento, poucos trabalhos práticos são encontrados relacionados a essa questão.

Uma das primeiras teorias quantitativas sobre envelhecimento e risco foi a curva de Gompertz que, embora seja um trabalho antigo, ainda é bastante utilizado atualmente em trabalhos como (HARGROVE, 1998), (MAKOWIEC; STAUFFER; ZIELINSKI, 2001), (FINKELSTEIN, 2006) e (HALLEN, 2007).

Em 1825, o atuário Benjamin Gompertz desenvolveu um modelo matemático que descreve as mudanças nas taxas de mortalidade da população no decorrer da vida (GOMPERTZ, 1825). Esse modelo foi desenvolvido a partir da observação de que a taxa de mortalidade cresce exponencialmente após os 30 anos de idade. A curva de Gompertz, ilustrada na Figura 16, é uma função sigmóide onde, para uma série temporal, o crescimento é mais lento no início e no final do período de tempo.

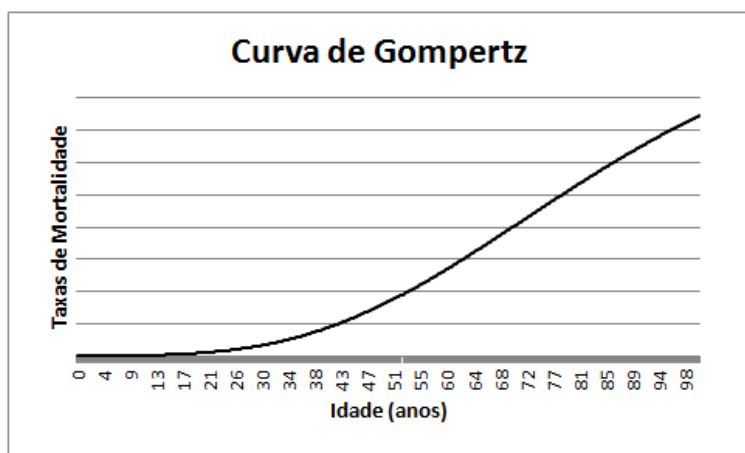


Figura 16 – Curva de Gompertz.

Baseado na curva de Gompertz, a lei de Gompertz-Makeham estabelece que a taxa de mortalidade é a soma do componente dependente da idade, proposto por Gompertz, e um componente independente de idade, chamado de termo Makeham, em homenagem ao autor do tra-

balho, William Makeham (MAKEHAM, 1860).

Na equação 2.7, proposta por Makeham, para calcular a taxa de mortalidade em uma determinada faixa etária (R), RII representa o risco independente de idade, R_0 indica a taxa de mortalidade inicial, t corresponde à idade do indivíduo e α representa a taxa de envelhecimento.

$$R = RII + R_0 e^{\alpha t} \quad (2.7)$$

Em ambientes protegidos, como condições de laboratório ou países de baixa mortalidade, onde as causas externas de morte são raras, o componente independente de idade é praticamente insignificante. Nesse caso, a equação simplificada resulta na curva de mortalidade de Gompertz.

A lei de Gompertz-Makeham reproduz curvas de mortalidade com precisão quando considerada a faixa etária entre 30 a 80 anos. Em idades mais avançadas, as taxas reais de mortalidade não aumentam tão rapidamente como previsto por essa lei. Outros pontos levantados acerca dessa equação é que além de não esclarecer doenças não relacionadas a idade, ela considera que o grupo em estudo vive em um ambiente bom e possui hábitos de vida saudáveis (HALLEN, 2007).

Outro trabalho importante, apontado como uma teoria relevante relacionada ao envelhecimento, é a analogia formulada entre o probabilidade de morte e a teoria da cinética dos gases (STREHLER; MILDVAN, 1960). De acordo com essa analogia, a distribuição de energia dos eventos de risco para sistemas vivos é parecida com a distribuição de energia cinética das moléculas dada a temperatura a que são submetidas. Essa distribuição, também conhecida como distribuição de Maxwell-Boltzmann, é ilustrada na Figura 17.

Na Figura 17, é possível observar que a quantidade de partículas que possuem pouca energia cinética é maior em relação à quantidade de partículas que possuem muita energia. A analogia dessa distribuição com a probabilidade de morte consiste no fato de que eventos de risco que representam pequenos desafios à sobrevivência, como por exemplo cortar um dedo ou tropeçar, são muito mais frequentes quando comparados a eventos de maior risco, como cair de uma escada ou ser atropelado por um carro em alta velocidade. De forma semelhante, a chance de uma pessoa ser acometida por uma doença muito grave é muito mais rara do que adoecer devido a pequenas infecções. Esses exemplos ilustram que eventos que representam desafios menores aos seres vivos são mais frequentes que eventos que oferecem grandes riscos a sua sobrevivência (STREHLER, 2000).

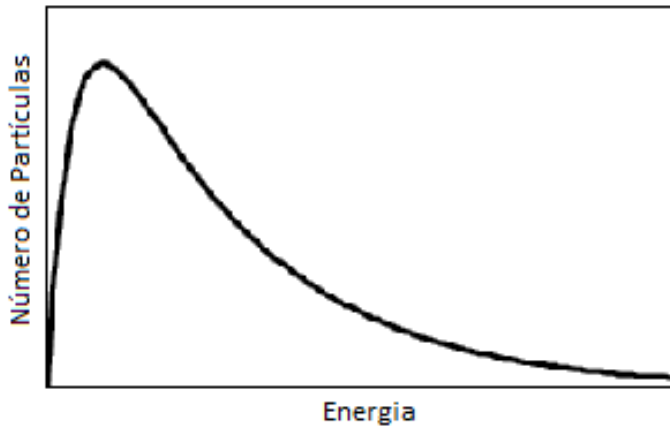


Figura 17 – Distribuição de Maxwell Boltzmann.

Considerando especificamente modelos de simulação computacional, um trabalho a ser destacado é o modelo estocástico desenvolvido por Penna baseado na teoria do acúmulo de mutação cujo objetivo principal é possibilitar a observação da criação, desenvolvimento e morte de indivíduos de uma população (PENNA, 1995). Nesse processo, o indivíduo nasce com uma carga genética que determina o momento a partir do qual passará a sofrer de uma doença ou da ocorrência de mutações que podem causar tanto o adiantamento quando o retardo da morte.

Cada indivíduo é representado por uma cadeia de bits que reproduz suas características genéticas (Figura 18). As posições do vetor podem ser associadas a uma medida de tempo indicativa da idade e o valor de cada posição indica se o indivíduo passará a sofrer de determinada doença genética naquela determinada idade. Se o indivíduo for acometido por uma doença, ele a carregará pelo resto da vida, sendo possível, inclusive, acumular doenças.

A morte pode acontecer de 3 formas: (1) quando o indivíduo atinge uma idade máxima determinada para a população, (2) quando o acúmulo de doenças for superior a um limiar que sugere um limite de sobrevivência, também determinado para a população ou (3) de acordo com uma probabilidade de morte que considera questões de alimento e espaço para a população.

Desde que foi formulado, esse modelo vem sofrendo adaptações

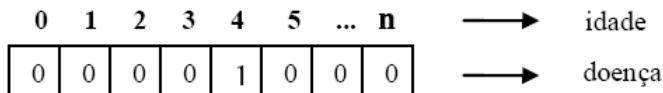


Figura 18 – Representação de um indivíduo no modelo Penna (PENNA, 1995).

de acordo com a necessidade de cada problema. A proposta original não considera as muitas doenças que são contraídas ao longo da vida, tratando somente de doenças genéticas. Isso motivou o desenvolvimento de um novo trabalho que incorpora características como a estrutura social das sociedades tecnológicas e possibilita modificar a idade de morte do indivíduo para mais, se ele contraiu alguma doença, ou para menos, em casos de melhora (OLIVEIRA et al., 1999). Outras alterações realizadas diminuíram o número de parâmetros livres (STAUFFER; RADOMSKI, 2001) e modificaram o tempo de reprodução dos indivíduos com o objetivo de refletir os resultados previstos pela equação de Gompertz (MAKOWIEC; STAUFFER; ZIELINSKI, 2001).

Embora os trabalhos desenvolvidos com base nesses simuladores tenham produzidos bons resultados, a taxa de mortalidade sofreu mudanças devido ao avanço da tecnologia e outras melhorias, como saneamento básico. O avanço da medicina possibilitou, inclusive, anular o efeito de mutações genéticas letais (RACCO, 2003).

2.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou a fundamentação teórica dos principais assuntos relacionados a esta pesquisa, descrevendo conceitos da modelagem e simulação dinâmica contínua, da lógica *fuzzy* e das teorias de envelhecimento.

A metodologia adotada para este trabalho foi baseada na Dinâmica de Sistemas, que tem como um de seus principais objetivos proporcionar um entendimento aprofundado dos elementos envolvidos no modelo e do comportamento das variáveis ao longo do tempo.

Especificamente na área médica e de saúde, é possível observar a prevalência de informações incertas. O estudo do modelo hierárquico de ignorância e as diversas formas de tratamento das incertezas inerentes aos sistemas apontou a lógica *fuzzy* como técnica apropriada para o

tratamento de problemas desse tipo.

O processo de envelhecimento é tema de estudos há muitos anos e, apesar do número notável de teorias, a falta de experimentação e de modelos de simulação relacionados a esse assunto é evidente. A lei de Gompertz-Makeham, uma das principais teorias quantitativas sobre envelhecimento e risco, apesar de descrever a dinâmica etária da mortalidade humana, só é considerada válida para idades entre 30 e 80 anos. Além disso, a lei Gompertz não esclarece doenças não relacionadas a idade e não considera o ambiente e os hábitos de vida da população, que podem envolver fatores de risco que aumentam em proporções diferentes da idade.

A pesquisa descrita neste trabalho propõe a expansão de um modelo de simulação dinâmica contínua com foco no envelhecimento e morte de populações através da modelagem de fatores de risco relacionados a doenças cardíacas a fim de auxiliar no entendimento da interação entre esses fatores e a ocorrência das doenças associadas a idade. Os detalhes do modelo base deste trabalho e da proposta de expansão são descritos no capítulo 3 a seguir. Além disso, a proposta inclui um módulo *fuzzy* capaz de estimar os parâmetros relacionados ao modelo a partir dos indicadores de risco, que é descrito mais adiante, no capítulo 4.

3 MODELO DE SIMULAÇÃO

As teorias de envelhecimento são resultados de levantamentos realizados para o entendimento do processo de envelhecimento. Embora essas teorias envolvam muitas hipóteses e equações matemáticas, a representação do conhecimento em sistemas de estrutura complexa ainda é um desafio. Neste contexto, a utilização da simulação de sistemas dinâmicos contínuos se apresenta como uma alternativa apropriada para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que o modelo envolve episódios complexos com mudanças que ocorrem continuamente no tempo.

A proposta de ampliação de um modelo estocástico de simulação de envelhecimento e morte já existente apresentada neste capítulo tem como objetivo incorporar elementos representativos dos hábitos de vida e condições de saúde da população, considerando também características como sexo e idade do indivíduo. Este capítulo apresenta os conceitos do modelo utilizado como base para o desenvolvimento do trabalho, bem como o detalhamento da proposta de ampliação com o objetivo de agregar mais características ao modelo original propiciando ainda mais adequação dos resultados com a realidade.

É importante ressaltar algumas delimitações identificadas para o modelo sugerido. O modelo não prova teorias de envelhecimento e suas particularidades e, embora se apresente como uma alternativa, não se trata de uma ferramenta que substitui outros métodos de estudo de populações. O modelo é restrito a representar apenas partes presentes no decorrer da vida de um indivíduo, não realizando, por exemplo, cruzamentos de informações genéticas e genealógicas dos indivíduos para geração de novos sujeitos.

3.1 MODELO ESTOCÁSTICO DE ENVELHECIMENTO E MORTE

O desenvolvimento deste trabalho baseia-se em um modelo de envelhecimento e risco desenvolvido como trabalho de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Catarina cujo principal objetivo foi desenvolver uma ferramenta de simulação estocástica para estudos de processos de envelhecimento de indivíduos humanos, através da modelagem dinâmica contínua e da modelagem *fuzzy* (SCHWAAB, 2009).

Baseado inicialmente em um modelo de envelhecimento e morte

de (HARGROVE, 1998), a essência do trabalho é fundamentada em teorias quantitativas relacionadas ao envelhecimento que propicia a simulação de eventos de riscos que podem ocorrer durante a vida de um indivíduo, retratando tanto forças favoráveis quanto desfavoráveis à sobrevivência de uma pessoa.

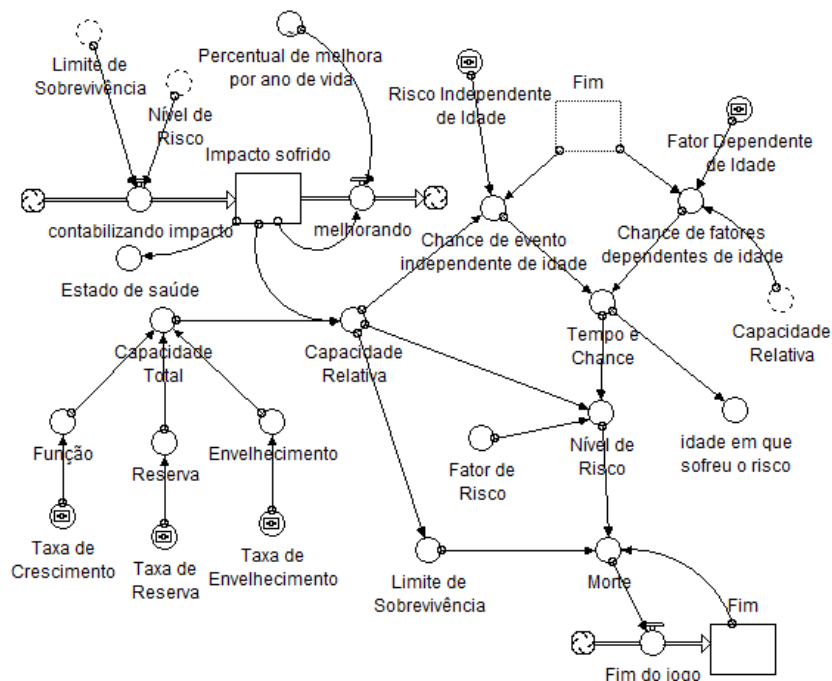


Figura 19 – Modelo estocástico de envelhecimento e morte (SCHWAAB, 2009).

No modelo da Figura 19, as capacidades total e relativa representam as funções fisiológicas do indivíduo. A Capacidade Total é composta por três elementos: (1) a Função, que está relacionada à autonomia do indivíduo, (2) a Reserva, que pode ser considerada como uma quantidade de energia que o indivíduo possui até a morte e (3) o Envelhecimento que, em oposição aos elementos Função e Reserva, faz a capacidade total do indivíduo diminuir. Cada um desses elementos tem sua intensidade definida, respectivamente, pelas taxas de crescimento, reserva e envelhecimento, que indicam características relacionadas à

genética e ao ambiente em que vive o indivíduo. A Capacidade Relativa, por sua vez, é derivada da Capacidade Total.

Além disso, o modelo expressa a ocorrência de problemas ao longo da vida do indivíduo, que podem ocorrer de forma acidental ou em consequência da idade. A ocorrência desses problemas é determinada pelos Fatores Dependentes de Idade, Risco Independente de Idade e pela Capacidade Relativa por meio do método estocástico de Monte Carlo (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964). Diante da ocorrência de um problema, o Nível de Risco determina a intensidade do evento que, comparado ao Limite de Sobrevivência do indivíduo, define se o sujeito sobrevive ou não ao episódio.

Caso o indivíduo sobreviva, um módulo de inferência *fuzzy* determina o quanto da sua saúde foi afetada e como a recuperação vai ocorrer com o passar do tempo. A recuperação da saúde depende, além do impacto que o evento representou, da idade do indivíduo, pois quanto maior a idade, menor a capacidade de recuperação (HAYFLICK, 1997).

3.1.1 Parâmetros do Modelo

O modelo apresentado dispõe de cinco parâmetros definidos *a priori* que, somados aos aspectos de aleatoriedade, determinam o comportamento do resultado obtido nas simulações realizadas.

TAXA DE CRESCIMENTO A taxa de crescimento (TC) determina o comportamento da função de crescimento de um indivíduo, representando sua capacidade funcional no decorrer da vida. Essa função de crescimento, denominada Função (F), cresce até atingir um valor máximo e se mantém constante pelo resto da vida. A Função é definida de acordo com a equação 3.1, onde t representa o tempo de simulação, ou seja, a idade do indivíduo.

$$F(t) = 40 + (40 * (1 - \exp(-TC * t))) \quad (3.1)$$

De acordo com essa expressão, é possível observar que o valor mínimo da função F é quarenta e que, com o passar do tempo, o resultado da exponencial se aproxima de zero, fazendo com que F se aproxime de oitenta.

No modelo em questão, a taxa de crescimento pertence ao intervalo pré-estabelecido $0,00 < TC \leq 0,05$. A Figura 20 apresenta o comportamento da função F considerando duas diferentes taxas de

crescimento que variam dentro desse intervalo. Com isso, é possível observar que quanto maior o valor de TC , mais rápido a função atinge seu valor máximo.

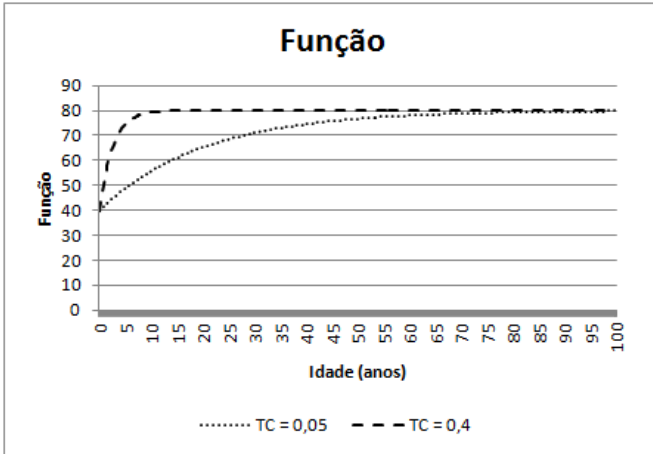


Figura 20 – Comportamento da função de crescimento.

TAXA DE RESERVA A taxa de reserva (TR) determina o comportamento da função que representa a energia vital do indivíduo. Definida pela expressão 3.2, a função Reserva (R), é caracterizada por um crescimento que ocorre até aproximadamente 20 anos e um decrescimento gradativo a partir dessa idade até o fim da vida.

$$R(t) = 10 + (10 * (1 - \exp(-TR * t)) - 10 * (1 - \exp(-0,04 * t))) \quad (3.2)$$

A Figura 21 ilustra o comportamento da função Reserva considerando dois valores para TR que variam dentro do intervalo pré-estabelecido $0,00 < TR \leq 0,50$. É possível observar que, quanto maior a taxa de reserva, maior é o ponto máximo da função R e mais rápido ele é atingido. Entretanto, é importante salientar que com o aumento de TR , mais rápido se inicia o decrescimento da função, fazendo com que a energia do indivíduo comece a diminuir antes do esperado.

TAXA DE ENVELHECIMENTO A taxa de envelhecimento (TE) determina o comportamento da função de mesmo nome que re-

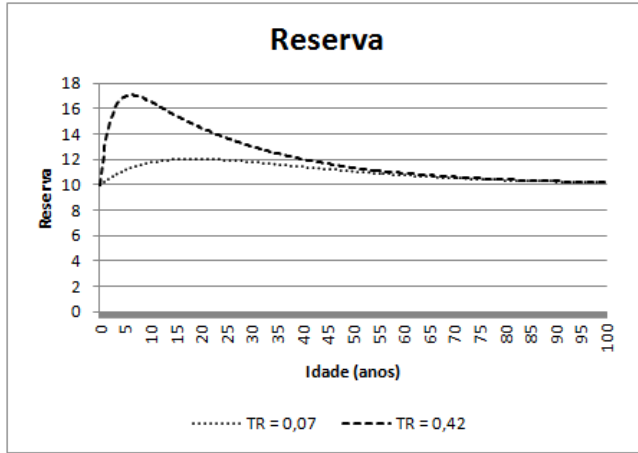


Figura 21 – Comportamento da função Reserva.

presenta um processo que se inicia após o indivíduo atingir um estágio máximo de desenvolvimento que, para Hargrove, se inicia após os 25 anos de idade (HARGROVE, 1998).

$$E(t) = \begin{cases} 90 * (1 - \exp(-TE * (t - 25))), & \text{se } t \geq 25 \\ 0, & \text{se } t < 25 \end{cases} \quad (3.3)$$

Como pode ser observado na equação 3.3, a função Envelhecimento (E) assume valor zero quando a idade do indivíduo é menor que 25 anos. Após essa idade, a função começa a crescer.

A Figura 22 apresenta os gráficos da função E considerando dois valores para a taxa de envelhecimento que variam dentro do intervalo pré-estabelecido $0,00 < TE \leq 0,05$. Com isso, é possível observar que o crescimento da função é mais acentuado para maiores valores de TE .

Juntos, a Função, a Reserva e o Envelhecimento resultam na Capacidade Total do indivíduo conforme definido pela equação 3.4. Enquanto F e R agregam valor a função, E , juntamente com outros ajustes dependentes do tempo de vida t , causam a redução de CT .

$$CT(t) = F(t) + R(t) - E(t) - (0,1 * t) - 10 * (1 - \exp(-0,01 * t)) \quad (3.4)$$

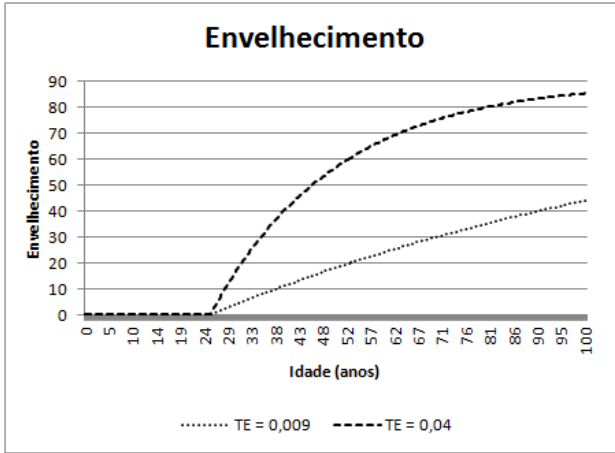


Figura 22 – Comportamento da função Envelhecimento.

Por fim, para calcular a aptidão efetiva do indivíduo diante de um risco, a Capacidade Relativa (CR) é derivada de CT de acordo com a equação 3.5.

$$CR(t) = \frac{CT(t) * (1 - I(t))}{87,67} * 100 \quad (3.5)$$

Nessa equação, I se refere ao impacto que o evento de risco, quando ocorrido, representa na saúde do indivíduo. Seu valor é o resultado do módulo de impacto e recuperação da saúde descrito mais adiante na seção 3.1.3.

A Figura 23 ilustra o comportamento de CT e CR . É possível observar que ambas as funções crescem até os 25 anos de idade e começam a diminuir logo em seguida, quando a função E passa a assumir um valor diferente de zero.

FATORES DEPENDENTES DA IDADE Os Fatores Dependentes da Idade (FDI) representam a vulnerabilidade do indivíduo a riscos imprevisíveis devido a fatores relacionados à idade. Seu valor define a probabilidade de um evento de risco desse tipo ocorrer durante a vida do sujeito.

$$EDI(t) = MonteCarlo\left(\frac{FDI * t}{CR(t)}\right) \quad (3.6)$$

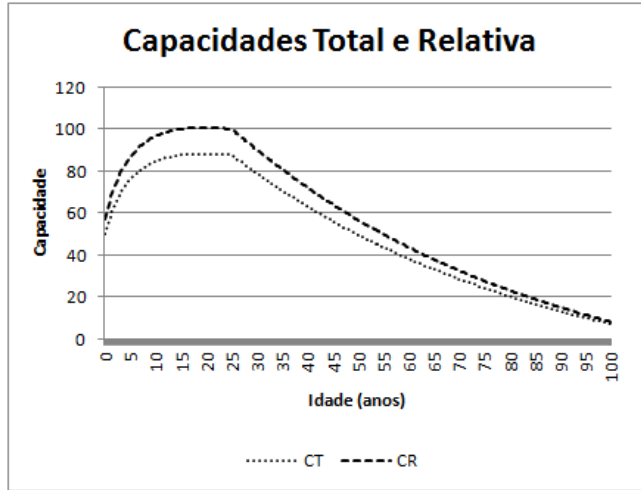


Figura 23 – Comportamento das funções Capacidade Total e Capacidade Relativa, considerando $TC = 0,14$, $TR = 0,139$, $TE = 0,018$ e $I = 0$.

De acordo com a equação 3.6, a ocorrência de um evento dependente de idade (EDI) é resultado da função *MonteCarlo*, que gera uma série de números zero e um de acordo com a probabilidade definida como parâmetro da função e, como já é de se esperar, a probabilidade desse evento ocorrer aumenta com o passar do tempo. Esse comportamento pode ser observado na Figura 24.

RISCO INDEPENDENTE DE IDADE O Risco Independente de Idade (RII) também representa a vulnerabilidade do indivíduo a riscos imprevisíveis, porém, esse parâmetro se refere a riscos alheios, totalmente independentes de idade.

$$EII(t) = MonteCarlo\left(\frac{2 * RII}{CR(t)}\right) \quad (3.7)$$

A ocorrência de um evento independente de idade (EII) também é definida por uma função *MonteCarlo*, conforme a equação 3.7 e, embora não dependa da idade do indivíduo, a probabilidade de ocorrência de eventos desse tipo também aumenta com o passar do tempo devido à diminuição da capacidade relativa, conforme ilustrado na Figura 25

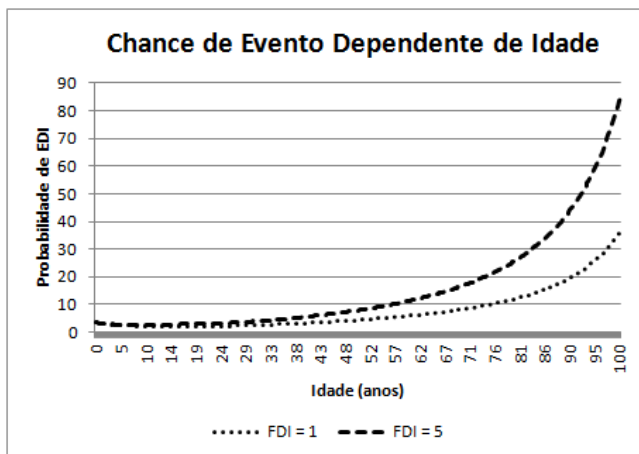


Figura 24 – Probabilidade de ocorrência de evento de risco dependente de idade.

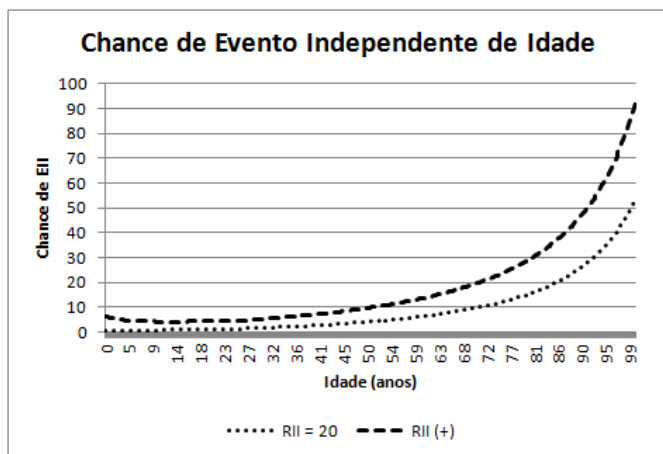


Figura 25 – Probabilidade de ocorrência de evento de risco independente de idade.

Juntos, esses dois fatores definem se o indivíduo deve ou não sofrer a ocorrência de um evento de risco (*OER*), seja ele dependente ou independente da idade.

$$OER(t) = EDI(t) \vee EII(t) \quad (3.8)$$

3.1.2 Nível de Risco

Diante da ocorrência de um evento de risco, o Fator de Risco (FR) agrega valores relativos às condições de saúde da população na determinação de quanto um evento vai significar para a saúde do indivíduo. O impacto que um evento de risco representa para a saúde de um indivíduo é chamado Nível de Risco (NR).

$$NR(t) = \begin{cases} Randon(0, FR(t) * CR(t)), & \text{se } OER(t) = 1 \\ 0, & \text{se } OER(t) = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

No modelo original, o parâmetro controlável FR tem seu valor definido *a priori* e se mantém o mesmo ao longo da simulação (HARGROVE, 1998). Essa forma de implementação faz com que FR atue com a mesma intensidade durante toda a vida de um indivíduo. Na alteração realizada por Schwaab, porém, o fator de risco atua de forma distinta para diferentes faixas etárias, ficando mais intenso com o passar da idade (SCHWAAB, 2009).

Com o objetivo de estudar duas curvas de mortalidade - mortalidade em geral e mortalidade por hipertensão - os valores de FR foram definidos de acordo com a curva em estudo. Para a curva de mortalidade geral, o valor de FR se inicia em 0.485 e termina em 0.70. Para as faixas etárias em questão, esses valores indicam um estado de saúde considerado razoável. Estes seriam, por exemplo, os riscos atribuídos a pessoas não fumantes ou que são fumantes em recuperação (HALL; ZWEMER, 1979). Já no caso da curva de mortalidade por hipertensão, FR variou de 0.453 a 1.1. Este intervalo representa desde sujeitos que apresentam risco muito reduzido, com os parâmetros de risco aparentemente normais, até as pessoas que apresentam a pressão arterial alterada, além de outros hábitos de vida como o fumo e o sedentarismo.

O Limite de Sobrevivência (LS) define o impacto máximo que o indivíduo suporta sofrer e é definido pela equação 3.10.

$$LS(t) = 0.45 * CR(t) \quad (3.10)$$

Se o nível de risco do evento sofrido ultrapassar o valor do limite de sobrevivência, o indivíduo morre. Porém, se o impacto for menor que

esse limite, a capacidade total do sujeito é depreciada, representando o impacto do evento na sua saúde.

3.1.3 Módulo de Impacto Recuperação da Saúde

O módulo de impacto e recuperação da saúde representa a habilidade de recuperação de um indivíduo diante de um impacto que põe em risco sua saúde e sua sobrevivência e tem como objetivo determinar a rapidez com que a recuperação pode acontecer dependendo da idade do indivíduo e da intensidade do impacto sofrido.

Os efeitos de um evento de risco causam impacto na capacidade de sobrevivência dos indivíduos, ou seja, o impacto desses efeitos representa as sequelas deixadas pela ocorrência de um evento de risco e que, possivelmente, se reduzem com o tempo, caracterizando a recuperação. Entretanto, a determinação da recuperação da saúde também é dependente da idade do indivíduo, pois, quanto maior a idade, menor a capacidade de recuperação.

Diante disso, o módulo de impacto e recuperação é composto por uma máquina de inferência do sistema *fuzzy* que possui como entradas as variáveis Idade e Impacto e gera como saída a Recuperação da saúde do indivíduo.

Para calcular a recuperação é preciso antes definir o impacto sofrido (I), ou seja, quanto o evento de risco afetou a saúde do indivíduo.

$$I(t) = I(t - 1) + (CI(t) - M(t)) \quad (3.11)$$

Na expressão 3.11, t é o tempo atual da simulação e $t - 1$ é o tempo imediatamente anterior. CI define quanto o evento ocorrido representa de impacto na saúde do indivíduo, agregando valor a I . Já M representa a recuperação da saúde do indivíduo após a ocorrência de um evento de risco, diminuindo, portanto, o valor de I . Seus valores são definidos, respectivamente, pelas equações 3.12 e 3.13.

$$CI(t) = \frac{NR(t)}{LS(t)} \quad (3.12)$$

$$M(t) = R(t) * I(t) \quad (3.13)$$

Na expressão 3.13, R representa a recuperação da saúde do sujeito e é resultado da máquina de inferência *fuzzy*. Para definir seu valor, são utilizadas as variáveis de entrada idade e impacto.

A idade é determinada por um intervalo de zero a 100 anos e

possui quatro conjuntos que, por representarem faixas de valores aproximadamente conhecidas, são determinados por funções de pertinência trapezoidal. A modelagem da variável idade pode ser observada na Figura 26.

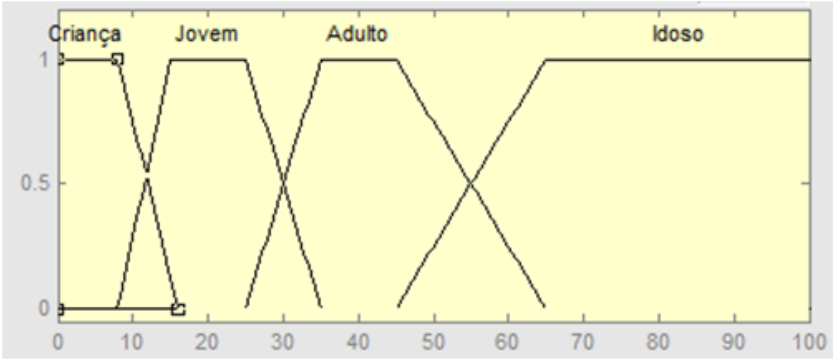


Figura 26 – Função de pertinência para a variável idade.

A função de pertinência trapezoidal depende de quatro parâmetros escalares, conforme demonstrado na equação 3.14.

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{se } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{se } d \leq x \end{cases} \quad (3.14)$$

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável idade são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros escalares da variável idade.

Conjunto	a	b	c	d
<i>Criança</i>	0	0	8	16
<i>Jovem</i>	8	16	24	35
<i>Adulto</i>	24	35	47	65
<i>Idoso</i>	47	65	100	100

A variável impacto é definida em um intervalo de zero a 1 e é composta por quatro conjuntos que foram distribuídos de maneira

aproximadamente uniforme entre o intervalo suporte da variável, como pode ser observado na Figura 27. Por se tratar de uma entrada com maior imprecisão em seus valores, o que impossibilita uma aproximação com faixas de valores melhor definidas, seus conjuntos foram modelados utilizando funções de pertinência sigmoide para os termos fraco e forte e pelo produto de duas sigmoides para os termos leve e moderado.

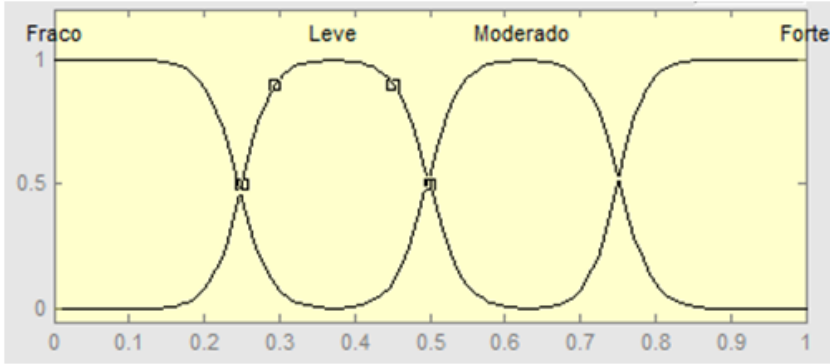


Figura 27 – Função de pertinência para a variável impacto.

A função de pertinência sigmoide depende de dois parâmetros escalares, conforme demonstrado na equação 3.15.

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (3.15)$$

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos fraco e forte da variável impacto são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros escalares dos conjuntos forte e fraco da variável impacto.

Conjunto	a	c
<i>Fraco</i>	-37.75	0.25
<i>Forte</i>	37.8	0.7526

Já a função de pertinência produto de sigmoides é simplesmente o produto de duas curvas sigmoides, conforme equação 3.16.

$$f1(x; a1, c1) * f2(x; a2, c2) \quad (3.16)$$

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos leve e moderado da variável impacto são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros escalares dos conjuntos leve e moderado da variável impacto.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Leve</i>	50	0.25	-50	0.5
<i>Moderado</i>	50	0.5	-50	0.75

Por fim, a variável recuperação foi definida de maneira semelhante, utilizando funções sigmoides (equação 3.15) e produto de sigmoides (equação 3.16) para classificar os valores em um intervalo de suporte entre zero e 1. A Figura 28 ilustra a modelagem da variável recuperação definida pelos conjuntos estável, lenta, moderada e rápida.

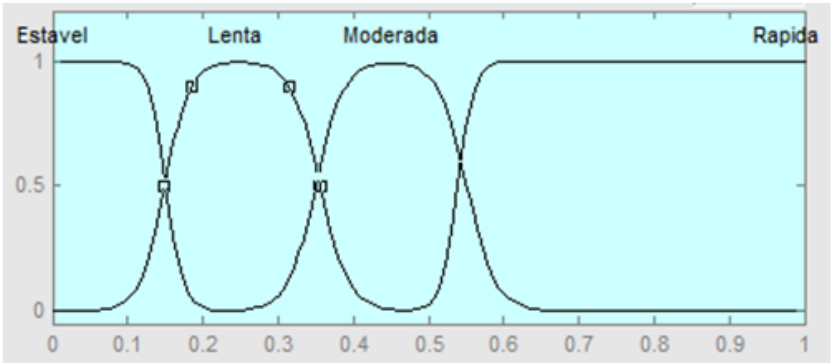


Figura 28 – Função de pertinência para a variável recuperação.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável recuperação são apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Parâmetros escalares dos conjuntos estável e rápida da variável recuperação.

Conjunto	a	c
<i>Estável</i>	-72.6	0.1506
<i>Rápida</i>	78.35	0.55

Tabela 5 – Parâmetros escalares dos conjuntos lenta e moderada da variável recuperação.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Lenta</i>	50	0.1526	-50	0.3526
<i>Moderada</i>	50	0.35	-50	0.55

A base de regras leva em consideração o fato de que a função vital do indivíduo diminui com o passar do tempo, fazendo com que a sua capacidade de recuperação da saúde diminua conforme sua idade aumenta. Essa característica faz com que o processo de melhora se torne cada vez mais lento. A Figura 29 apresenta a base de regras, composta por 16 regras SE-ENTÃO do tipo E formando sentenças como, por exemplo:

SE idade é criança E impacto é fraco ENTÃO recuperação é rápida.

Idade	Impacto			
	<i>Fraco</i>	<i>Leve</i>	<i>Moderado</i>	<i>Forte</i>
<i>Criança</i>	Rápida	Rápida	Moderada	Lenta
<i>Jovem</i>	Rápida	Rápida	Moderada	Moderada
<i>Adulto</i>	Moderada	Moderada	Lenta	Lenta
<i>Idoso</i>	Lenta	Estável	Estável	Estável

Figura 29 – Base de regras para recuperação.

Após sucessivas simulações para calibração do modelo, os parâmetros do sistema *fuzzy* que produziram o resultado mais condizente com a realidade da recuperação da saúde foram:

- T-Norma: produto
- Implicação: produto
- Agregação: máximo
- Desfuzzificação: SOM (*smallest of maximum*)

A superfície de resposta obtida com base nas regras e parâmetros do sistema é apresentada pela Figura 30. Nela é possível perceber que quanto maiores os valores de idade e impacto, menor é a recuperação da saúde.

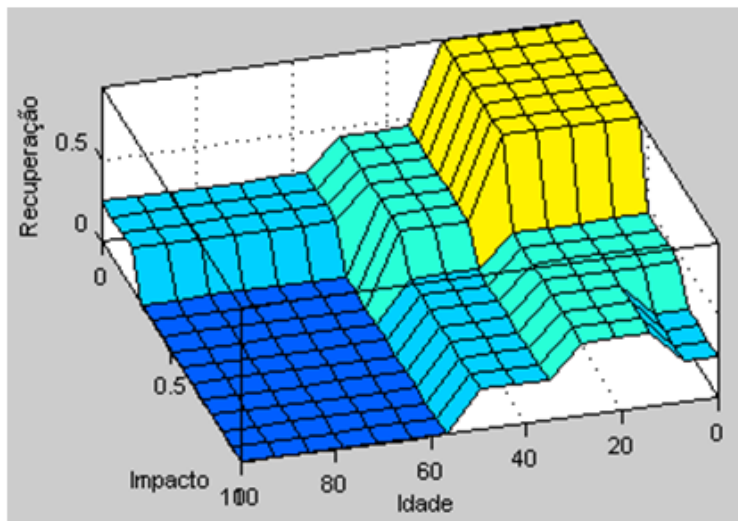


Figura 30 – Superfície de resposta: recuperação da saúde.

3.1.4 Influência dos Fatores

O diagrama do modelo de (SCHWAAB, 2009), com a representação da influência das relações entre as partes, é apresentado na Figura 31. Nele é possível observar todos os elementos existentes no modelo e o tipo de efeito que cada elemento exerce nos outros diretamente envolvidos.

As influências apresentadas na Figura 31 são classificadas como positivas e negativas. Nas influências positivas, os elementos envolvidos na influência sofrem variações no mesmo sentido, ou seja, o aumento do valor de um causa o aumento do outro e a diminuição do valor de um causa a diminuição do outro. Já nas influências negativas, as variações dos elementos são em sentidos contrários, isto é, o aumento de um fator causa a diminuição do outro ou a diminuição de um causa o aumento do outro.

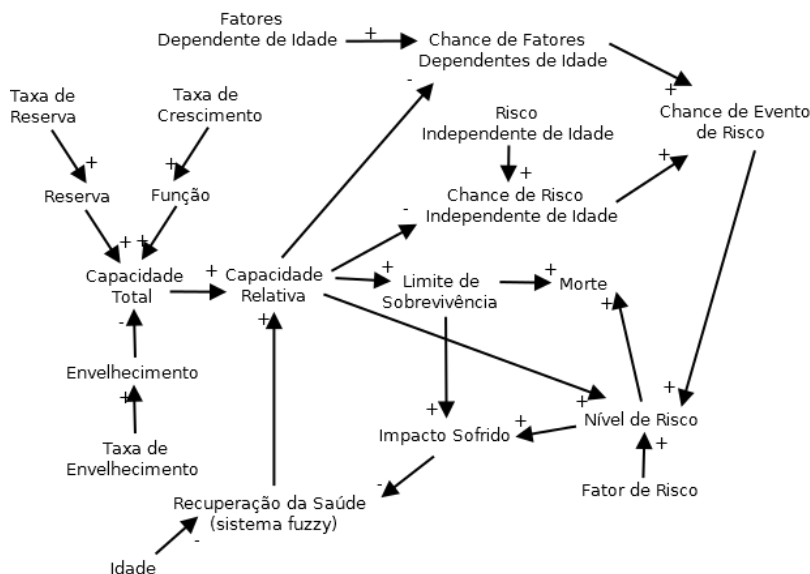


Figura 31 – Diagrama do modelo base com a influência dos fatores (adaptado de (SCHWAAB, 2009)).

3.2 PROPOSTA DE AMPLIAÇÃO DO MODELO

Utilizando como base o modelo de (SCHWAAB, 2009), a proposta de ampliação para este trabalho tem como objetivo determinar a probabilidade de morte de um indivíduo de acordo com sua idade e suas características de saúde e hábitos de vida.

Por ser uma classe de doenças que se encontra entre as principais causas de morte no mundo todo, as doenças cardiovasculares são o foco dessa proposta cujo objetivo é simular o comportamento de uma população que apresenta um conjunto de fatores característicos para avaliação dessa causa mortis. A ampliação do modelo, apresentada na Figura 32, incorpora elementos vindos das tábuas de vida de Harvey Geller (CENTER FOR HEALTH PROMOTION AND EDUCATION (U.S.), 1982) que possibilitam que características como sexo, idade e indicadores de risco sejam utilizadas para determinar a ocorrência de algum problema de saúde no decorrer da vida do indivíduo.

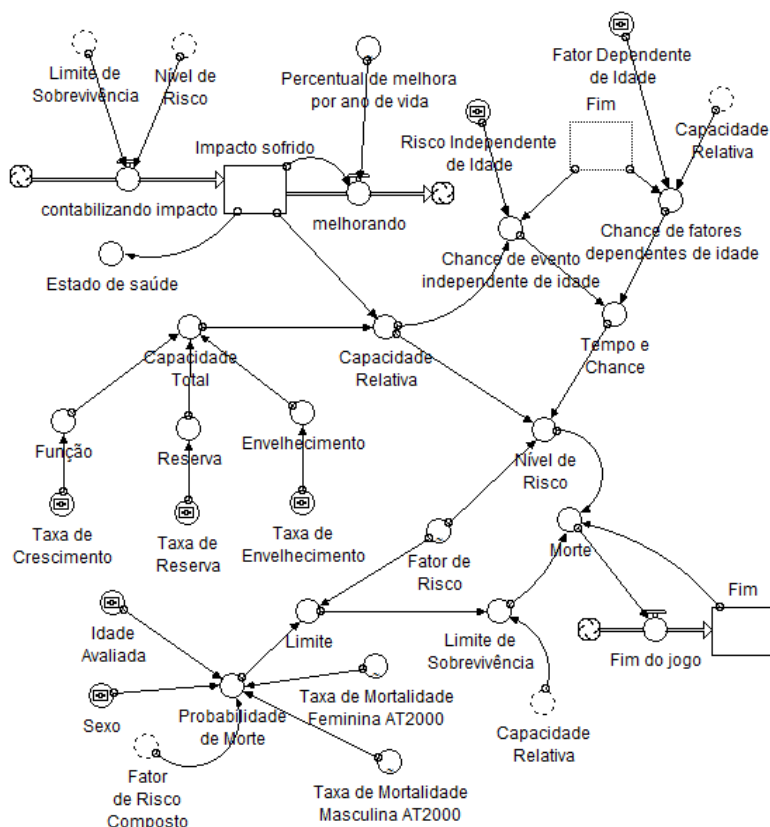


Figura 32 – Proposta de ampliação do modelo.

3.2.1 Fator de Risco Composto

O Fator de Risco Composto (*FRC*) indica o risco que um indivíduo apresenta para uma determinada causa de morte e é calculado a partir de indicadores de risco individuais aplicáveis para a causa de morte em questão. O *FRC* representa a probabilidade do indivíduo que apresenta determinadas características prognósticas morrer vítima da causa de morte em avaliação.

O *FRC* é calculado a partir do valor de diversos indicadores que representam as características de saúde e hábito de vida da população.

As entradas para o cálculo são os valores de cada indicador, de acordo com o sexo e a idade do indivíduo. Os indicadores considerados para doenças cardiovasculares são: sístole, diástole, colesterol, diabetes, atividade física, tabagismo e obesidade. Os valores desses fatores de risco, de acordo com o sexo e a idade, foram extraídos das tabelas de Harvey Geller e são apresentadas no Anexo A (CENTER FOR HEALTH PROMOTION AND EDUCATION (U.S.), 1982).

Nessa tabela, o valor de cada indicador de risco, chamado razão do fator de risco (RF), é calculado pela *odds ratio* da expressão 3.17.

$$RF = \frac{p_1(1 - p_2)}{p_2(1 - p_1)} \quad (3.17)$$

Na expressão 3.17, p_1 é a probabilidade de morte devido à doença em questão para membros de um grupo com determinado indicador de risco e p_2 é a probabilidade de morte pela mesma causa para todos os membros do grupo.

Na ampliação do modelo, para calcular o FRC de um indivíduo, os diversos indicadores de risco são combinados da seguinte forma: todos os indicadores com fator < 1 são multiplicados juntos e seu produto é adicionado a soma de todos os indicadores de fator > 1 . A quantidade de indicadores de risco > 1 é subtraída dessa soma (HARGROVE, 1998). A Figura 33 apresenta o módulo construído para o cálculo do FRC .

Observando o cálculo implementado, é possível concluir que os indicadores de risco que apresentam fatores menores que 1 ocasionam uma diminuição no FRC , enquanto os indicadores que possuem fatores maiores 1 fazem o FRC aumentar. Além disso, os indicadores que apresentam fator de risco igual a 1 não causam nenhum impacto no FRC .

3.2.2 Probabilidade de Morte

A probabilidade de morte define a possibilidade do indivíduo falecer devido à ocorrência de um evento de risco. Na proposta de ampliação do modelo, a probabilidade de morte aplicável à todos os indivíduos simulados é definida de acordo com uma tabela atuarial. As tabelas atuariais, também chamadas de tábuas de mortalidade, possuem dados provenientes de censos populacionais, que possibilitam calcular as probabilidades de vida e morte de uma população, em função da idade (HALLEY, 1693). No Brasil existem três tábuas de mortalidade populacionais criadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e

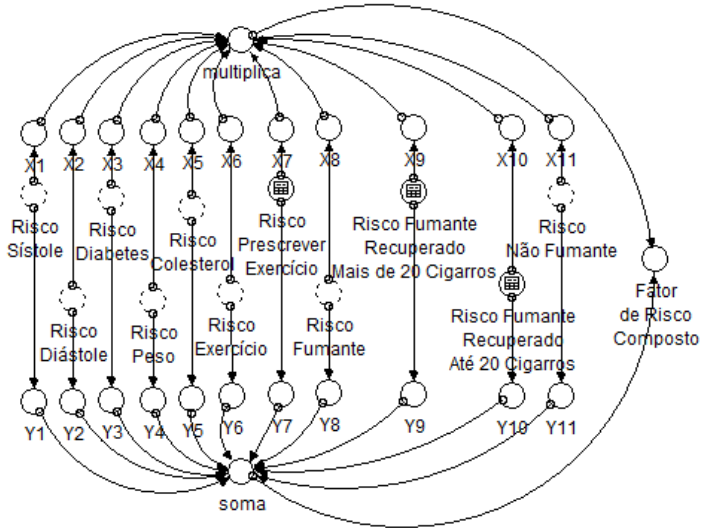


Figura 33 – Cálculo do Fator de Risco Composto (*FRC*).

Estatística) - Experiência Brasileira 1980, 1991 e 2002 - e anualmente são divulgadas tábuas geradas a partir de um modelo de projeção populacional elaborado com essas informações conhecidas (BRASIL, 2012).

Entretanto, para implementação da proposta de aplicação do modelo, foi utilizada a tábua americana AT-2000 (JOHANSEN, 1996), desenvolvida pela SOA (*The Society of Actuaries*) (THE SOCIETY OF ACTUARIES, 2012). Essa tabela apresenta um perfil diferente da média da população brasileira, com uma expectativa de vida mais elevada. Porém, é amplamente utilizada em planos de previdência privada com o objetivo de diminuir as margens de erro nos cálculos.

Como é possível observar na Figura 32, para calcular a probabilidade de morte (*PM*), se a idade do indivíduo simulado é menor que a idade avaliada, o *FRC* não é aplicado à probabilidade de morte, sendo considerada a taxa de mortalidade provável correspondente a sua idade e sexo (AT-2000). Porém, se um indivíduo possui idade igual ou maior que a idade avaliada, a taxa de mortalidade provável é multiplicada pelo *FRC* calculado, resultando assim em uma nova probabilidade de morte que pode ter sido agravada ou amenizada de acordo com os hábitos de vida do indivíduo que estão refletidos no valor do *FRC*.

A probabilidade de morte resultante é utilizada para calcular seu

limite de sobrevivência na faixa etária em que se encontra no decorrer da simulação. Originalmente, o limite de sobrevivência era calculado apenas em função da capacidade relativa do indivíduo, conforme exibido na equação 3.10. A alteração proposta faz com que o limite de sobrevivência seja variado de acordo com a probabilidade de morte calculada, que substitui o multiplicador constante do limite de sobrevivência original por um valor correspondente, porém, derivado da probabilidade de morte do indivíduo. O objetivo dessa alteração é fazer com que o comportamento da função limite de sobrevivência reflita o impacto que o FRC representa para a sobrevivência do indivíduo, ou seja, quanto maior a probabilidade de morte, menor o limite de sobrevivência, e vice versa.

Para calcular o novo multiplicador do limite de sobrevivência foi utilizado como ponto de partida os valores do Fator de Risco (FR) para mortalidade em geral. Neste cálculo, os valores de FR são adotados como certeza de morte para o indivíduo, ou seja, 100%. O Limite (L) define o multiplicador que vai definir o limite de sobrevivência do indivíduo de acordo com a expressão 3.18, onde FR e PM correspondem, respectivamente, ao fator de risco e a probabilidade de morte do sujeito.

$$L(t) = \frac{(FR(t) * 100) - (FR(t) * PM(t))}{100} \quad (3.18)$$

Por fim, a fórmula do limite de sobrevivência apresentada anteriormente foi alterada conforme a equação 3.19.

$$LS(t) = L(t) * CR(t) \quad (3.19)$$

O objetivo desse cálculo é fazer com que, ao se comparar as curvas do nível máximo do risco e do limite de sobrevivência, a distância entre elas corresponda a probabilidade de morte que foi anteriormente calculada.

3.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou a proposta de ampliação de um modelo estocástico de simulação de envelhecimento e morte com o objetivo de incorporar elementos representativos dos hábitos de vida e condições de saúde da população, com base nas tabelas de risco de Harvey Geller, além de considerar características como sexo e idade do indivíduo.

Foi introduzida uma nova forma de calcular a probabilidade de

morte do sujeito, baseada nas informações relacionadas a seu estado de saúde e seus hábitos de vida, bem como sua idade e seu sexo. Com isso, espera-se obter um modelo que reproduza curvas de mortalidade reais características para diferentes casos estudados onde a causa da morte é caracterizada por doenças cardiovasculares. O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos com o modelo ampliado.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MODELO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa. O projeto de experimentos tem como objetivo identificar os fatores mais influentes do modelo, possibilitando maior domínio na sua parametrização. As simulações realizadas com o modelo ampliado tiveram como objetivo gerar resultados aproximados de dados reais para que então, considerando uma margem de erro, o modelo pudesse ser considerado válido para a realidade estudada.

4.1 PROJETO DE EXPERIMENTOS

Esta seção tem como objetivo analisar o projeto de experimentos realizado sobre o modelo ampliado com relação ao impacto de cada um dos parâmetros existentes na saída do modelo. Esse estudo foi fundamental para o entendimento adequado dos fatores do modelo.

Como já explanado no capítulo 3, o modelo é composto por cinco parâmetros. As taxas de crescimento, de reserva e de envelhecimento determinam a capacidade de um indivíduo sobreviver aos eventos de risco. Os fatores dependentes de idade e o risco independente de idade determinam a probabilidade de ocorrência de um evento de risco, seja em decorrência da idade ou não. Todos os parâmetros foram incluídos no projeto de experimentos. Dada a existência de intervalos pré-estabelecidos para esses parâmetros, o projeto de experimentos utilizou como limites inferior e superior valores aproximados das extremidades dos intervalos. Os casos definidos para a análise são apresentados na Figura 34.

Para coleta dos dados que subsidiaram a análise foram geradas 3 amostras de 1000 simulações cada para cada caso estudado. Cada simulação representa um indivíduo dos 0 até os 100 anos. Os testes estatísticos utilizando a análise de variância (ANOVA) foram efetuados considerando o nível de significância de 5% ($p \text{ valor} \leq 0,05$). As saídas consideradas para a análise apresentada são os percentuais de mortes para cada faixa etária definida por um intervalo de 10 anos. Como a idade de morte é arredondada para um número inteiro sem casas decimais, foi considerado o intervalo fechado no limite inferior e aberto no limite superior. A primeira classe, por exemplo, é formada pelo intervalo $[0, 10)$, ou $0 \vdash 10$, conforme simbologia comumente utilizada em Estatística (BARBETTA; REIS; BORNIA, 2004).

Casos		Feminino	Masculino
Caso 1	<i>Diabetes</i>	Não Diabético	Não Diabético
	<i>Exercício</i>	Vigoroso	Vigoroso
	<i>Fumante</i>	Não Fumante	Não Fumante
	<i>Peso</i>	10% abaixo da média	10% abaixo da média
	<i>Colesterol</i>	180	180
	<i>Sístole</i>	120	120
	<i>Diástole</i>	80	80
Caso 2	<i>Diabetes</i>	Diabético Controlado	Diabético Controlado
	<i>Exercício</i>	Pouco	Pouco
	<i>Fumante</i>	de 10 à 19 cigarros/dia	de 20 à 39 cigarros/dia
	<i>Peso</i>	20% acima da média	20% acima da média
	<i>Colesterol</i>	220	220
	<i>Sístole</i>	160	160
	<i>Diástole</i>	95	95
Caso 3	<i>Diabetes</i>	Diabético	Diabético
	<i>Exercício</i>	Sedentário	Sedentário
	<i>Fumante</i>	de 20 à 39 cigarros/dia	mais de 40 cigarros/dia
	<i>Peso</i>	60% acima da média	60% acima da média
	<i>Colesterol</i>	280	280
	<i>Sístole</i>	200	200
	<i>Diástole</i>	105	105

Figura 34 – Casos simulados para o projeto de experimentos.

TAXA DE CRESCIMENTO Os valores assumidos como limites para análise do parâmetro taxa de crescimento (TC) são:

- Limite inferior: 0.05;
- Limite superior: 0.4.

Os demais parâmetros foram configurados assumindo os valores conforme Tabela 6.

Os resultados da ANOVA para cada caso são apresentados na Tabela 7, destacando os resultados estatisticamente significativos. As colunas Masc e Fem apresentam, respectivamente, os resultados para os casos dos sexos masculino e feminino.

Considerando os resultados da Tabela 7 é possível observar, para o caso 1, que apenas a faixa etária de 30 a 40 anos do sexo masculino sofreu influência com a variação da TC (p valor $< 0,05$). Para o caso 2 é possível afirmar que nenhuma faixa etária foi influenciada pela variação

Tabela 6 – Demais parâmetros do modelo para ANOVA da taxa de crescimento.

Parâmetro	Valor
Taxa de Envelhecimento	0.015
Taxa de Reserva	0.05
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

Tabela 7 – ANOVA da taxa de crescimento (p valor).

Faixa Etária (anos)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)
0 ┆ 10	0.66	*	*	0.37	*	0.37
10 ┆ 20	*	*	*	*	*	*
20 ┆ 30	0.37	0.37	0.37	*	*	*
30 ┆ 40	0.01	0.14	0.77	0.89	0.42	0.77
40 ┆ 50	0.62	0.91	0.46	0.10	0.57	0.65
50 ┆ 60	0.35	0.23	0.58	0.51	0.90	0.03
60 ┆ 70	0.37	0.72	0.66	0.47	0.23	0.91
70 ┆ 80	0.67	0.45	0.47	0.78	0.22	0.37
≥ 80	0.46	0.68	0.59	0.86	0.95	0.15

da TC. Já para o caso 3, apenas as mulheres entre 50 e 60 apresentaram diferenças diante da variação da TC, a taxa de mortalidade diminuiu com o aumento da TC. Apesar das poucas influencias apresentadas, é possível concluir que o parâmetro taxa de crescimento não causa impacto no resultado modelo, considerando os 3 casos estudados.

TAXA DE RESERVA Os valores assumidos como limites para análise do parâmetro Taxa de Reserva (TR) são:

- Limite inferior: 0.07;
- Limite superior: 0.42.

Os demais parâmetros foram configurados assumindo os valores conforme Tabela 8.

Os resultados, para cada caso, são apresentados na Tabela 9, destacando os resultados estatisticamente significativos. As colunas

Tabela 8 – Demais parâmetros do modelo para ANOVA da taxa de reserva.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Envelhecimento	0.015
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

Masc e Fem apresentam, respectivamente, os resultados para os casos dos sexos masculino e feminino.

Tabela 9 – ANOVA da taxa de reserva (p valor).

Faixa Etária (anos)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)
0 ⊢ 10	*	*	0.37	*	1.00	1.00
10 ⊢ 20	0.49	*	*	0.37	*	*
20 ⊢ 30	0.48	0.37	0.37	*	0.37	*
30 ⊢ 40	0.37	0.64	0.25	0.33	0.37	0.70
40 ⊢ 50	0.16	0.43	0.64	0.15	0.47	0.43
50 ⊢ 60	0.61	0.29	0.23	0.20	0.87	0.88
60 ⊢ 70	0.69	0.70	0.02	0.14	0.89	0.90
70 ⊢ 80	0.17	0.63	0.59	0.01	0.27	0.43
≥ 80	0.16	0.32	0.26	0.19	0.12	0.87

De acordo com o resultado da Tabela 9, nenhuma faixa etária foi influenciada pela variação da TR para o caso 1. Para o caso 2, os homens com idade entre 60 e 70 apresentaram diferenças consequentes da alteração da TR. O mesmo aconteceu com as mulheres na faixa etária dos 70 aos 80 anos. Em ambos os casos, a taxa de mortalidade aumentou com o aumento da TR. Para o caso 3, nenhuma faixa etária sofreu influência diante da variação da TR. Diante desses resultados, é possível concluir que o parâmetro Taxa de Reserva também não causa impacto no resultado modelo, considerando os 3 casos estudados.

TAXA DE ENVELHECIMENTO Os valores assumidos como limites para análise do parâmetro Taxa de Envelhecimento (TE) são:

- Limite inferior: 0.009;

- Limite superior: 0.04.

Os demais parâmetros foram configurados assumindo os valores conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Demais parâmetros do modelo para ANOVA da taxa de envelhecimento.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Reserva	0.05
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

Os resultados, para cada caso, são apresentados na Tabela 11, destacando os resultados estatisticamente significativos. As colunas Masc e Fem apresentam, respectivamente, os resultados para os casos dos sexos masculino e feminino.

Tabela 11 – ANOVA da taxa de envelhecimento (p valor).

Faixa Etária (anos)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)
0 ┊ 10	0.37	0.55	0.37	*	0.02	*
10 ┊ 20	0.37	0.37	*	*	*	*
20 ┊ 30	*	0.37	1.00	0.37	*	0.37
30 ┊ 40	*	*	0.69	0.47	0.07	0.29
40 ┊ 50	0.00	0.00	0.26	0.10	0.01	0.01
50 ┊ 60	0.01	0.19	0.15	0.00	0.00	0.00
60 ┊ 70	0.06	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
70 ┊ 80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
≥ 80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

De acordo com a Tabela 11 é possível observar que, para o caso 1, todas as faixas etárias acima dos 40 anos foram influenciadas. Com o aumento da TE, as 2 faixas iniciais do sexo masculino, de 40 a 50 e de 50 a 60 anos tiveram uma diminuição na taxa de mortalidade das amostras. Para o sexo feminino, a faixa etária de 40 a 50 anos apresentou a mesma diminuição. Já a faixa de 70 a 80 anos apresentou aumento na taxa de mortalidade da população independente do sexo avaliado. Uma importante característica observada nas amostras, para

ambos os sexos, é que, com o parâmetro TE em seu limite superior, a idade máxima que um indivíduo atinge é 74.5 anos, pois é nessa idade que a capacidade relativa do indivíduo atinge 0, causando sua morte. Em decorrência dessa característica, as amostras simuladas com TE no limite superior não tiveram nenhuma morte na faixa etária 80 anos ou mais, pois todos os seus indivíduos morreram antes de atingí-la.

Avaliando o caso 2, os homens acima dos 60 anos morrem mais quando o valor de TE é maior. Já no caso das mulheres, esse aumento começa a ser observado a partir dos 50 anos. Da mesma forma como no caso anterior, o alto valor da TE ocasiona que a idade máxima dos indivíduos simulados seja de 74.5 anos. Por isso, o mesmo comportamento pode ser observado na faixa de 80 anos ou mais.

Para o caso 3, a taxa de mortalidade de ambos os sexos acima dos 40 anos aumentou com o aumento da TE. Para o sexo masculino, esse aumento também pode ser observado na faixa etária de 0 a 10 anos. Neste caso, o alto valor da TE também faz com que os indivíduos morram até os 74.5 anos. Por isso, o mesmo comportamento pode ser observado na faixa 80 anos ou mais das amostras.

Diante desses resultados, é possível concluir que o parâmetro Taxa de Envelhecimento causa bastante impacto no resultado da simulação, em ambos os sexos, para todos os casos avaliados, principalmente nas faixas etárias acima dos 40 anos.

FATOR DEPENDENTE DE IDADE Os valores assumidos como limites para análise do parâmetro Fator Dependente de Idade (FDI) são:

- Limite inferior: 1;
- Limite superior: 5.

Os demais parâmetros foram configurados assumindo os valores conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Demais parâmetros do modelo para ANOVA do fator dependente de idade.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Reserva	0.05
Taxa de Envelhecimento	0.015
Risco Independente de Idade	100

Os resultados, para cada caso, são apresentados na Tabela 13, destacando os resultados estatisticamente significativos. As colunas Masc e Fem apresentam, respectivamente, os resultados para os casos dos sexos masculino e feminino.

Tabela 13 – ANOVA do fator dependente de idade (p valor).

Faixa Etária (anos)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)
0 ┊ 10	0.37	0.37	*	*	*	1.00
10 ┊ 20	*	0.37	*	0.37	0.37	1.00
20 ┊ 30	*	0.37	0.12	0.12	0.52	*
30 ┊ 40	0.06	0.73	0.66	0.86	0.54	0.12
40 ┊ 50	0.00	0.00	0.02	0.30	0.11	0.01
50 ┊ 60	0.00	0.13	0.06	0.15	0.00	0.02
60 ┊ 70	0.55	0.97	0.01	0.10	0.00	0.00
70 ┊ 80	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
≥ 80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

A Tabela 13 mostra que, no caso 1, para o sexo masculino, a taxa de mortalidade nas faixas etárias de 40 a 50 anos e de 70 a 80 anos foram influenciadas pela variação do FDI, aumentando seu valor com o aumento de FDI. Ainda para o sexo masculino, a taxa de mortalidade na faixa dos 50 aos 60 anos e acima dos 80 diminuiu com o aumento da FDI, decorrentes do aumento das mortes nas faixas anteriores. O sexo feminino apresentou o mesmo comportamento do sexo masculino nas faixas de 40 a 50 anos e 80 anos ou mais.

Para o caso 2, apenas as taxas de mortalidade das faixas etárias de 40 a 50 anos para o sexo masculino e de 70 a 80 anos para ambos os sexos foram alteradas em decorrência do aumento do parâmetro. A taxa de mortalidade na faixa de 60 a 70 anos para o sexo feminino não foi influenciada, enquanto que na faixa 80 anos ou mais de ambos os sexos seu valor diminuiu. Para o caso 3, a taxa de mortalidade do sexo masculino entre os 50 e os 80 anos aumentou diante do aumento do FDI. Esse mesmo comportamento pode ser observado para o sexo feminino, porém já acima dos 40 anos. Na faixa etária acima dos 80 anos, para ambos os sexos, a taxa de mortalidade diminuiu com o aumento do FDI.

Diante desses resultados, é possível concluir que o parâmetro Fator Dependente de Idade causa bastante impacto no resultado da

simulação, em ambos os sexos, para todos os casos avaliados, nas faixas etárias acima dos 40 anos.

RISCO INDEPENDENTE DE IDADE Os valores assumidos como limites para análise do parâmetro Risco Independente de Idade (RII) são:

- Limite inferior: 20;
- Limite superior: 180.

Os demais parâmetros foram configurados assumindo os valores conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Demais parâmetros do modelo para ANOVA do risco independente de idade.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Reserva	0.05
Taxa de Envelhecimento	0.015
Fator Dependente de Idade	4

Os resultados, para cada caso, são apresentados na Tabela 15, destacando os resultados estatisticamente significativos. As colunas Masc e Fem apresentam os resultados para os casos do sexo masculino e feminino, respectivamente.

No caso 1, para o sexo masculino, a taxa de mortalidade das faixas de 30 a 40, de 40 a 50 e de 70 a 80 anos foram influenciadas pela variação do RII. Aumentando o RII, seus valores aumentaram. O contrário foi observado na faixa dos 50 a 60 anos, cuja taxa de mortalidade diminuiu com o aumento do RII. Já na faixa acima dos 80 anos a taxa de mortalidade diminuiu como aumento do RII. Para o sexo feminino, a taxa de mortalidade das faixas de 30 a 40, de 40 a 50 e de 70 a 80 anos foram influenciadas pela variação do RII da mesma forma que no sexo masculino. Apenas na faixa acima dos 80 anos é que o aumento do RII ocasionou a diminuição da taxa de mortalidade.

Já no caso 2, para o sexo masculino, as idades entre 30 e 40 anos e entre 50 e 80 anos foram influenciadas pela variação do RII. Com o aumento do parâmetro, em todos esses casos houve o aumento da taxa de mortalidade. Apenas para a faixa etária acima dos 80 anos que a taxa de mortalidade diminuiu. Para o sexo feminino esse mesmo

Tabela 15 – ANOVA do risco independente de idade (p valor).

Faixa Etária (anos)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)	Masc (%)	Fem (%)
0 ┆ 10	*	*	*	*	1.00	*
10 ┆ 20	*	*	*	*	*	0.37
20 ┆ 30	0.37	0.37	0.16	0.37	*	0.37
30 ┆ 40	0.00	0.00	0.02	0.06	0.04	0.02
40 ┆ 50	0.00	0.00	0.21	0.07	0.00	0.00
50 ┆ 60	0.02	0.44	0.03	0.08	0.00	0.00
60 ┆ 70	0.27	0.25	0.00	0.01	0.00	0.00
70 ┆ 80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
≥ 80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

comportamento pode ser observado, porém, apenas a partir dos 60 anos de idade. Na faixa de 50 a 60 anos a taxa de mortalidade não foi influenciada pelo aumento do RII.

Por fim, para o caso 3, a taxa de mortalidade de ambos os sexos entre os 30 e os 80 anos aumentou diante do aumento do RII. Como consequência desse aumento, a faixa etária acima dos 80 anos apresentou uma diminuição na taxa de mortalidade.

Diante desses resultados, é possível concluir que o parâmetro Risco Independente de Idade também causa bastante impacto no resultado da simulação, em ambos os sexos, para todos os casos avaliados, nas faixas etárias acima dos 30 anos.

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

A etapa de validação tem como objetivo avaliar os resultados obtidos com o modelo de simulação por meio da comparação dos resultados produzidos pelo simulador com os dados reais. Se os resultados produzidos se aproximarem dos dados reais, o modelo se torna válido para a realidade para a qual foi testado (FREITAS FILHO, 2008).

Porém, uma das maiores dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento deste trabalho foi encontrar uma base de dados que dispusesse de informações tanto sobre as características prognósticas de uma população quanto de sua mortalidade para que fosse possível a validação dos resultados do modelo mediante comparação com dados

reais.

Muitos estudos sobre a biologia normal humana podem ser feitos de forma relativamente rápida e barata com base em um grupo qualquer de indivíduos cooperativos. Porém, avaliar mudanças relacionadas à idade requer um cuidado especial tanto na escolha dos participantes quanto na forma de realização do estudo. Uma das precauções que deve ser tomada, por exemplo, é se certificar de que os participantes não estejam doentes, pois a doença pode interferir na avaliação de muitas mudanças normais da idade, ocasionando que mudanças causadas por doenças sejam erroneamente atribuídas ao envelhecimento. E mesmo em um grupo de pessoas idosas saudáveis, haverá grandes variações de uma para outra em quase todas as mudanças mensuráveis associadas à idade. Um aspecto certamente indiscutível sobre o envelhecimento normal é a magnitude das variações individuais que podem ser observadas.

Em um estudo chamado estudo de corte transversal, participantes de diversas idades e características são selecionados aleatoriamente e, com isso, características casuais dos participantes podem ocasionar inferências erradas sobre o processo de envelhecimento, constituindo um método ineficaz para estudo de mudanças associadas à idade. Por isso, a forma mais indicada de estudar essas mudanças é através de um estudo chamado longitudinal, onde, normalmente, os participantes são selecionados ainda jovens e são estudados periodicamente à medida que vão envelhecendo (ou até sua morte).

Embora seja o melhor padrão para avaliação das mudanças que ocorrem com a idade, um estudo longitudinal sofre de pelo menos três desvantagens críticas. Primeiro, acompanhar um grupo de pessoas durante muitos anos é dispendioso. Segundo, os sujeitos precisam ser suficientemente dedicados ao estudo para que se coloque periodicamente à disposição para avaliações durante o resto de suas vidas; pessoas que se apresentam como voluntárias para esses estudos tendem a ter um nível superior de escolaridade, melhores condições de vida e de saúde do que a população em geral e, normalmente, não são heterogeneamente representativas, compondo uma amostra tendenciosa. Um terceiro problema apresentado por esses estudos longitudinais que acompanham pessoas de diferentes idades é que cada faixa etária, chamada *coorte*, foi exposta a fatores ambientais diferentes no passado. Por exemplo, em um estudo que compreende pessoas de vinte, trinta, quarenta, cinquenta e sessenta anos, os grupos mais jovens terão se beneficiado de avanços mais recentes da medicina, higiene e nutrição que não foram desfrutados por seus compatriotas mais idosos.

Além de todas as dificuldades citadas, outras duas características tornam raros os estudos longitudinais sobre a biologia do envelhecimento em seres humanos: os custos e o enorme período de tempo necessário para produzir dados úteis.

Para possibilitar a validação da ampliação proposta para o modelo base, foram utilizadas informações derivadas de duas fontes de dados:

PROJETO EPIDOSO (RAMOS et al., 1998) O projeto EPIDOSO (Epidemiologia do Idoso) trata de um estudo epidemiológico longitudinal realizados com idosos, desenvolvido pelo Centro de Estudos do Envelhecimento da Universidade Federal de São de Paulo, que permite identificar os fatores determinantes de uma vida longa e livre de doenças incapacitantes. O estudo EPIDOSO conduziu um acompanhamento por dois anos de uma população idosa residente no bairro Saúde, na cidade de São Paulo. O bairro escolhido, além da proximidade com o centro de coordenação do estudo, possui uma população relativamente estável, sem migrações ou emigrações significantes representante da classe média da população. Todas as pessoas com 65 anos completos na data do levantamento foram elegíveis para uma entrevista que foi conduzida em cada residência. No total, 1667 pessoas foram entrevistadas. O questionário aplicado possui informações de características sócio-demográficas, suporte informal, independência nas atividades diárias, doenças crônicas, saúde mental, situação cognitiva e autopercepção da saúde.

FUNDAÇÃO SEADE (SÃO PAULO, 2011) Os dados dos participantes do estudo EPIDOSO foram cruzados com os dados de mortalidade fornecidos pela Fundação SEADE (Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados) do Estado de São Paulo. O objetivo desse cruzamento foi identificar os óbitos dessa população, com suas respectivas datas e causas de morte. Com isso, foi possível determinar a idade que o participante tinha quando morreu e qual o motivo que o levou à morte. As causas de morte são classificadas de acordo com a CID-10 (Classificação Internacional de Doenças), que foi conceituada para padronizar e catalogar as doenças e problemas relacionados à saúde, tendo como referência a Nomenclatura Internacional de Doenças, estabelecida pela Organização Mundial de Saúde (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2010).

Após a atualização dos dados de mortalidade foram totalizados

820 óbitos (com ou sem causa de morte estabelecida). Desses, 163 óbitos foram decorrentes de doenças do aparelho circulatório, classificadas pela CID-10 pelos códigos de I00 a I99.

Para avaliação desses dados, as informações sobre mortes ocorridas decorrentes de doenças do aparelho circulatório foram agrupadas em casos que levaram em consideração as perguntas existentes no estudo EPIDOSO que representavam variáveis do modelo de simulação proposto. São elas:

- Pressão alta
- Diabetes
- Obesidade
- Atividade física

Para as 3 primeiras variáveis, as perguntas do questionário do projeto EPIDOSO foram feitas na forma “Tem pressão alta?”, “Tem diabetes?” e “Tem obesidade?”. As respostas, por sua vez, foram classificadas em (1) Sim - interfere na minha vida, (2) Sim - não interfere na minha vida e (3) Não.

A quarta variável foi respondida pelas perguntas “Pratica atividade física? (Sim/Não) Quantas vezes na semana?”. Para fazer uma correspondência com as 3 variáveis anteriores, as respostas a essa pergunta foram classificadas em (1) Sim - 3 ou mais vezes na semana, (2) Sim - até 2 vezes na semana e (3) Não.

Com a combinação de todas as classificações das variáveis foi possível determinar 81 (3^4) casos. Cada caso foi avaliado separadamente para cada sexo. A maioria dos casos apresentaram poucos óbitos (0 a 2), tornando inviável a determinação de taxas de mortalidade por não serem representativos.

Foram então selecionados os casos que mais apresentaram óbitos. 4 casos foram selecionados, 2 para o sexo feminino e 2 para o masculino. Como o projeto EPIDOSO é um estudo voltado para os idosos, seus participantes apresentam idade superior a 60 anos. Por isso, os dados de mortalidade foram divididos em 3 faixas etárias, agrupadas de dez em dez anos, exceto uma delas, que considera os indivíduos que possuem oitenta ou mais anos de idade. Os intervalos para as faixas etárias são considerados fechados no limite inferior e abertos no limite superior. O objetivo dessa separação é possibilitar que a verificação dos resultados seja realizada por faixas etárias. A quantidade de mortes e a taxa de mortalidade de cada faixa etária, para cada um dos casos selecionados, são apresentadas nas Tabelas de 16 à 19.

CASO 1

- Sexo: Masculino
- Pressão alta: Não
- Diabetes: Não
- Obesidade: Não
- Atividade física: Não

Tabela 16 – Caso 1.

Faixa Etária (anos)	Quantidades de Mortes	Taxa de Mortalidade (%)
60 ┤ 70	0	0
70 ┤ 80	3	16.67
≥ 80	15	83.33
Total	18	100

CASO 2

- Sexo: Feminino
- Pressão alta: Sim - não interfere na minha vida
- Diabetes: Não
- Obesidade: Não
- Atividade física: Não

Tabela 17 – Caso 2.

Faixa Etária (anos)	Quantidades de Mortes	Taxa de Mortalidade (%)
60 ┤ 70	0	0
70 ┤ 80	3	17.65
≥ 80	14	82.35
Total	17	100

CASO 3

- Sexo: Feminino
- Pressão alta: Não
- Diabetes: Não
- Obesidade: Não
- Atividade Física: Sim - 3 ou mais vezes por semana

Tabela 18 – Caso 3.

Faixa Etária (anos)	Quantidades de Mortes	Taxa de Mortalidade (%)
60 ┤ 70	0	0
70 ┤ 80	2	6.9
≥ 80	27	93.1
Total	29	100

CASO 4

- Sexo: Masculino
- Pressão alta: Não
- Diabetes: Não
- Obesidade: Não
- Atividade física: Sim - 3 ou mais vezes por semana

Tabela 19 – Caso 4.

Faixa Etária (anos)	Quantidades de Mortes	Taxa de Mortalidade (%)
60 ┤ 70	0	0
70 ┤ 80	3	30
≥ 80	7	70
Total	10	100

Para adaptar o modelo de simulação à realidade do projeto EPIDOSO, o cálculo do fator de risco composto foi alterado, mantendo apenas as variáveis que foram utilizadas no questionário e a correspondência das respostas com a tabela de Harvey Geller foi realizada conforme detalhamento abaixo.

PRESSÃO ALTA Para descrever a variável pressão alta, 3 níveis foram definidos, de acordo com as respostas disponíveis no questionário do EPIDOSO.

- Sim - interfere na minha vida: para essa resposta foram utilizadas as curvas dos indicadores de risco Diástole para o valor 160 e Sístole para o valor 100. Esses valores foram escolhidos por já representarem a hipertensão grave.
- Sim - não interfere na minha vida: para essa resposta foram utilizadas as curvas dos indicadores de risco Diástole para o valor 140 e Sístole para o valor 90. Esses valores foram escolhidos por representarem a hipertensão leve.
- Não: para essa resposta foram utilizadas as curvas dos indicadores de risco Diástole para o valor 120 e Sístole para o valor 80. Esses valores foram escolhidos por representarem a pressão arterial considerada normal.

DIABETES Para descrever a variável diabetes, 3 níveis foram definidos, de acordo com as respostas disponíveis no questionário do EPIDOSO.

- Sim - interfere na minha vida: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Diabetes para o valor Diabético.
- Sim - não interfere na minha vida: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Diabetes para o valor Diabetes Controlado.
- Não: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Diabetes para o valor Não Diabético.

OBESIDADE Para descrever a variável obesidade, 3 níveis foram definidos, de acordo com as respostas disponíveis no questionário do EPIDOSO.

- Sim - interfere na minha vida: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Peso para o valor 60% Acima da Média.
- Sim - não interfere na minha vida: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Peso para o valor 20% Acima da Média.
- Não: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Peso para o valor Na Média.

ATIVIDADE FÍSICA Para descrever a variável atividade física, 3 níveis foram definidos, de acordo com as respostas disponíveis no questionário do EPIDOSO.

- Sim - 3 ou mais vezes na semana: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Exercício para o valor Vigoroso.
- Sim - até 2 vezes na semana: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Exercício para o valor Pouco Exercício.
- Não: para essa resposta foi utilizada a curva do indicador de risco Exercício para o valor Sedentário.

Cada simulação completa do modelo representa um indivíduo e o resultado dessa simulação representa o seu tempo de vida. No conjunto de mil indivíduos, tamanho da amostra considerada para a validação do modelo, esses valores foram agrupados de forma que se obtivesse o percentual de mortalidade em cada faixa etária.

Para validar os resultados do modelo, vários testes foram realizados no ajuste dos parâmetros, com o objetivo de reproduzir curvas de mortalidade reais características dos casos estudados onde a causa da morte é identificada por doenças cardiovasculares. A determinação dos valores dos parâmetros levou em conta a sensibilidade revelada no projeto experimental realizado e a observação dos dados resultantes, conforme já apresentado na seção 4.1. Esses testes apontaram as taxas de envelhecimento e de reserva como os parâmetros cujas variações se mostram mais adequadas à reprodução das curvas de mortalidade estudadas. Por isso, esses parâmetros são foco de um módulo de inferência *fuzzy* que possibilita a estimativa de seus valores, descrito mais adiante, na seção 4.3.

Nesta fase de validação, no entanto, o objetivo não foi alcançar resultados iguais aos dados reais, mas, aproximados, dentro de uma

margem de erro aceitável. A verificação dos resultados foi realizada com o cálculo de intervalos de confiança para cada faixa etária. Os resultados obtidos são apresentados nos gráficos a seguir, que indicam a curva gerada pelo modelo apresentado, a curva dos dados reais e os limites do intervalo de confiança considerando $\alpha = 0.05$.

Todos os casos de estudo selecionados foram utilizados para validar a ampliação proposta para o modelo.

CASO 1 Para o caso 1 (sexo masculino, que não apresenta pressão alta, não apresenta diabetes, não apresenta obesidade e não pratica atividades físicas), chegou-se aos resultados esperados com os parâmetros apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Parâmetros para o caso 1.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Envelhecimento	0.018
Taxa de Reserva	0.05
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

A Tabela 21 mostra, em percentagem, as taxas de mortalidade obtidas para este caso de estudo, considerando a saída do modelo, o intervalo de confiança encontrado e o verdadeiro valor da população.

Tabela 21 – Resultado do modelo para o caso 1.

Faixa Etária (anos)	Limite Inferior	Saída do Modelo	Valores Reais	Limite Superior
60 ⊢ 70	-2.10	1.29	0	4.69
70 ⊢ 80	7.38	12.60	16.67	17.81
≥ 80	83.15	86.11	83.33	89.07

A Figura 35 apresenta o gráfico com os resultados do modelo para o caso de validação.

Com base nesses resultados, o modelo é considerado válido para essa realidade, já que a curva de mortalidade real da população estudada ficou dentro do intervalo de confiança adotado (com $\alpha = 0.05$).

CASO 2 Para o caso 2 (sexo feminino, que apresenta pressão alta leve, que não interfere na vida, não apresenta diabetes, não apre-

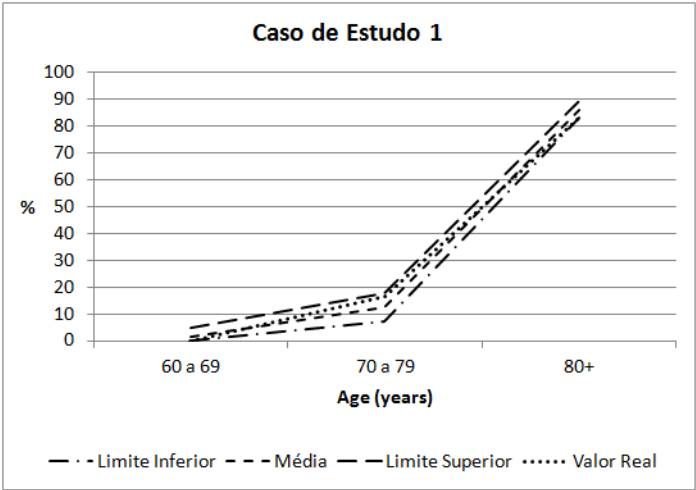


Figura 35 – Resultados do modelo para o caso 1.

senta obesidade e não pratica atividades físicas), os resultados foram obtidos utilizando-se os parâmetros apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros para o caso 2.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Envelhecimento	0.021
Taxa de Reserva	0.05
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

A Tabela 23 mostra os resultados para este caso de estudo. Os valores apresentados correspondem às taxas de mortalidade (%) obtidas, considerando a saída do modelo, o intervalo de confiança encontrado e o verdadeiro valor da população.

A Figura 36 apresenta o gráfico com os resultados do modelo para este caso de estudo.

De acordo com esses resultados, a taxa de mortalidade na faixa etária dos 60 aos 70 anos é baixa, ficando abaixo de 7%. Já dos 70 aos 80 há uma elevação no seu valor, que fica entre 9 e 21%. Por fim, acima dos 80 anos a taxa de mortalidade fica, aproximadamente, entre 80 e

Tabela 23 – Resultados do modelo para o caso 2.

Faixa Etária (anos)	Limite Inferior	Saída do Modelo	Valores Reais	Limite Superior
60 ┤ 70	-1.68	2.27	0	6.22
70 ┤ 80	9.35	15.14	17.65	20.93
≥ 80	80.46	82.58	82.35	84.70

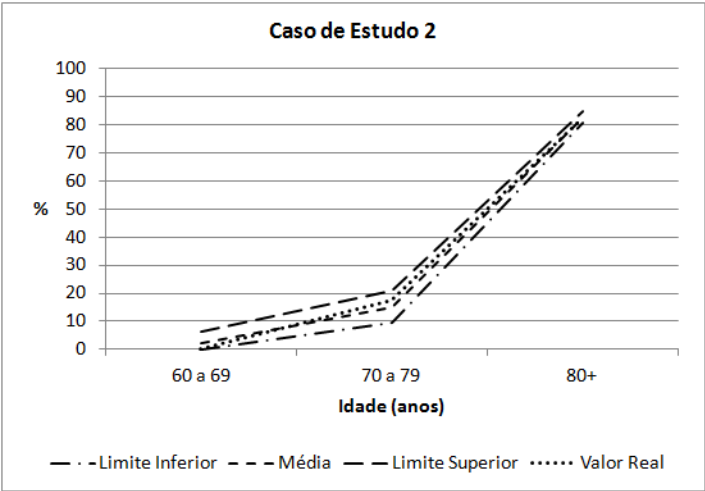


Figura 36 – Resultados do modelo para o caso 2.

85%.

CASO 3 Os resultados do modelo para este caso de estudo (sexo feminino que não apresenta pressão alta, não apresenta diabetes, não apresenta obesidade e pratica atividades físicas 3 ou mais vezes na semana) foram obtidos utilizando-se os parâmetros apresentados na Tabela 24.

A Tabela 25 mostra, em percentagem, as taxas de mortalidade obtidas para este caso de estudo, considerando a saída do modelo, o intervalo de confiança encontrado e o verdadeiro valor da população.

A Figura 37 apresenta o gráfico com os resultados do modelo para este caso de estudo.

De acordo com esses resultados, a taxa de mortalidade na pri-

Tabela 24 – Parâmetros para o caso 3.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Envelhecimento	0.017
Taxa de Reserva	0.42
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

Tabela 25 – Resultados do modelo para o caso 3.

Faixa Etária (anos)	Limite Inferior	Saída do Modelo	Valores Reais	Limite Superior
60 ┤ 70	-1.03	1.02	0	3.07
70 ┤ 80	2.27	7.52	6.90	12.76
≥ 80	84.22	91.46	93.10	98.70

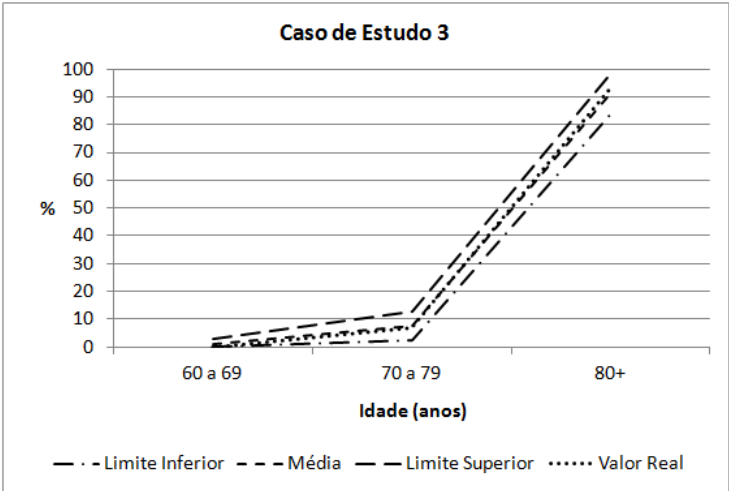


Figura 37 – Resultados do modelo para o caso 3.

meira faixa etária (dos 60 aos 70 anos) é praticamente nula, ficando abaixo de 4%. Na faixa etária que vai dos 70 aos 80 anos a taxa de mortalidade assume um valor entre 2 e 13% e, por fim, na faixa etária acima de 80 anos seu valor fica entre 84 e 99%.

Os casos 1 e 2 diferem nas características referentes à pressão alta e à prática de atividades físicas. Comparando seus resultados é possível observar que no caso 2 a taxa de mortalidade diminuiu nas duas primeiras faixas etárias em relação ao caso 1. Essa observação leva a concluir que a manutenção da pressão arterial e a prática de atividades físicas causam impacto no tempo de vida do indivíduo, retardando a morte da população.

CASO 4 Para o caso 4 (sexo masculino que não apresenta pressão alta, não apresenta diabetes, não apresenta obesidade e pratica atividades físicas 3 ou mais vezes na semana), os resultados foram obtidos utilizando-se os parâmetros da Tabela 26.

Tabela 26 – Parâmetros para o caso 4.

Parâmetro	Valor
Taxa de Crescimento	0.14
Taxa de Envelhecimento	0.022
Taxa de Reserva	0.03
Risco Independente de Idade	100
Fatores Dependentes de Idade	4

A Tabela 27 mostra os resultados para este caso de estudo. Os valores apresentados correspondem às taxas de mortalidade (%) obtidas, considerando a saída do modelo, o intervalo de confiança encontrado e o verdadeiro valor da população.

Tabela 27 – Resultados do modelo para o caso 4.

Faixa Etária (anos)	Limite Inferior	Saída do Modelo	Valores Reais	Limite Superior
60 ⊢ 70	-0.99	2.97	0	6.93
70 ⊢ 80	19.23	25.87	30	32.51
≥ 80	63.93	71.16	70	78.39

A Figura 38 apresenta o gráfico com os resultados do modelo para este caso de estudo.

De acordo com esses resultados, taxa de mortalidade na faixa etária dos 60 aos 70 anos fica abaixo de 7%. Já na faixa etária dos 70 aos 80 anos o valor da taxa de mortalidade fica entre 19 e 33%. Por fim, acima dos 80 anos seu valor está no intervalo entre 63 e 79%.

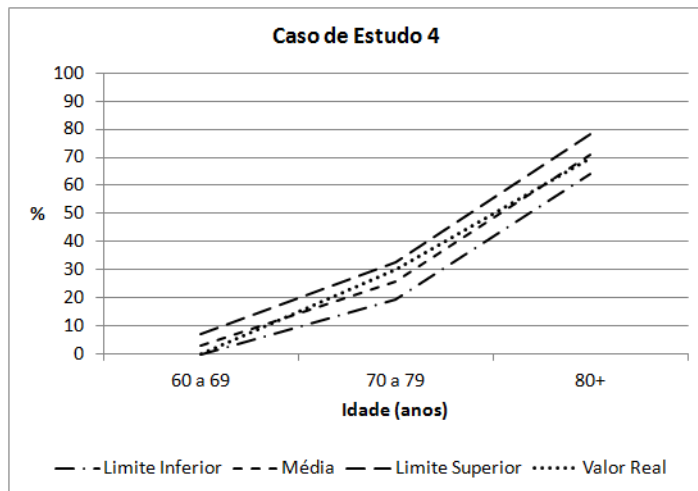


Figura 38 – Resultados do modelo para o caso 4.

Os casos 2 e 3 diferem apenas na característica referente ao sexo da população. Comparando seus resultados é possível observar que no caso 3 a taxa de mortalidade aumentou na segunda faixa etária em relação ao caso 2. Essa observação leva a concluir que a característica sexo está relacionada ao tempo de vida do indivíduo, antecipando a morte da população.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MÓDULO DE ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS

Para obter os resultados apresentados na seção 4.2, vários ajustes devem ser realizados nos parâmetros com o objetivo de reproduzir as curvas de mortalidade reais. A determinação dos valores leva em conta a observação dos dados resultantes do projeto experimental realizado com os parâmetros do modelo de simulação, conforme apresentado na seção 4.1. A análise da sensibilidade do modelo mostrou que os parâmetros taxa de crescimento e taxa de reserva tem mais impacto na determinação da mortalidade em faixas etárias menores. Já a taxa de envelhecimento, o risco dependente de idade e os fatores independentes de idade se relacionam com as faixas etárias maiores, podendo causar mortalidade precoce se estiverem muito elevados, ou retardar a

mortalidade se estiverem muito baixos.

A determinação dos parâmetros na busca de resultados mais aproximados dos dados reais não é uma tarefa trivial, sendo necessário verificar cada faixa etária à procura da causa do erro sempre que o resultado não se mostra adequado. Uma vez que cada simulação representa custo de tempo, buscar uma combinação de parâmetros que possibilitem alcançar resultados ideais representa um custo alto. Além disso, a parametrização correta do modelo exige conhecimento aprofundado da influência de cada um dos fatores no resultado gerado pelo simulador, além de ser necessário levar em consideração características específicas da população que se pretende estudar. Cabe ressaltar ainda que a definição dos parâmetros está inserida em um contexto de incerteza que sugere o desenvolvimento de estudos complexos e muitos questionamentos.

Diante disso, foi desenvolvido um módulo de inferência *fuzzy* cujo objetivo é estimar os valores dos parâmetros a partir dos indicadores de risco que definem as características da população em estudo e atuam como entradas do modelo. Com essa proposta, espera-se facilitar a utilização do modelo, inclusive por pessoas de outras áreas de conhecimento, sem ser necessário conhecer profundamente o modelo, a medicina ou a fisiologia humana.

Os parâmetros estimados através desta solução foram determinados a partir da análise de sensibilidade do modelo e da observação das variações realizadas na etapa de validação. Nesta fase, a variação das taxas de envelhecimento e de reserva se mostrou bastante adequada para possibilitar a reprodução de resultados mais condizentes com as realidades estudadas. Dessa forma, o módulo *fuzzy* implementado possibilita estimar os valores dessas taxas a partir dos indicadores de risco que servem de entrada para o modelo. Para isso, cada um dos indicadores utilizados foi modelado de forma a classificar seus valores numéricos entre as respostas utilizadas na base de dados do projeto EPIDOSO. Na simulação, os valores dos indicadores de risco são definidos no início da execução, as taxas de envelhecimento e reserva são determinadas e permanecem inalteradas até o final da simulação.

4.3.1 Pressão Alta

A expressão pressão arterial refere-se à força com a qual o coração bombeia o sangue através dos vasos sanguíneos. Seu valor é determinado pelo volume de sangue que sai do coração e a resistência que ele

encontra para circular pelo corpo. Ciclo cardíaco é o termo referente aos eventos relacionados ao fluxo e pressão sanguíneos que ocorrem desde o início de um batimento cardíaco até o próximo batimento. Esse ciclo é dividido em dois períodos: o ciclo de relaxamento que ocorre quando o coração recebe o sangue proveniente das veias é chamado de diástole, já o ciclo de contração, que ocorre quando o coração ejeta o sangue para as artérias, é denominado sístole.

A hipertensão arterial, conhecida popularmente como pressão alta, ocorre quando há o aumento da pressão arterial, atingindo níveis acima dos valores de referência para a população em geral. Conforme as Diretrizes Brasileira de Hipertensão Arterial da Sociedade Brasileira de Cardiologia, os valores da pressão arterial são classificados da seguinte forma (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARDIOLOGIA, 2010):

- 120x80mmHg: com esses valores, a pressão arterial é considerada ótima;
- 130x85mmHg: valores de pressão arterial considerados limítrofes;
- 140x90mmHg e 159x99mmHg: valores pressóricos superiores à 140x90mmHg já denotam hipertensão. Nesta faixa, a hipertensão é considerada leve, chamada também de estágio 1;
- 160x100mmHg e 179x109mmHg: hipertensão moderada, chamada estágio 2;
- acima de 180x110mmHg: hipertensão grave, também chamada de estágio 3.

De acordo com essa classificação, o sistema *fuzzy* que define a variável pressão alta é formado por duas entradas, sístole e diástole, e por uma saída que é a pressão alta. Foram criadas três funções de pertinência, duas para as entradas e uma para a saída.

A sístole é determinada para um intervalo de 120 a 200 e é composta pelos conjuntos Normal, Limítrofe, Estágio 1, Estágio 2 e Estágio 3. Por representar faixas de valores aproximadamente conhecidas, cada um destes conjuntos foi elaborado como uma função de pertinência trapezoidal (equação 3.14). A Figura 39 apresenta os conjuntos definidos para a sístole.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável sístole são apresentados na Tabela 28.

De forma semelhante à sístole, a variável diástole foi modelada utilizando os mesmos conjuntos Normal, Limítrofe, Estágio 1, Estágio



Figura 39 – Função de pertinência para a variável sístole.

Tabela 28 – Parâmetros escalares da variável sístole.

Conjunto	a	b	c	d
<i>Normal</i>	80	120	129	132
<i>Limitrofe</i>	127	130	139	145
<i>Estágio 1</i>	138	140	159	165
<i>Estágio 2</i>	155	160	179	185
<i>Estágio 3</i>	175	180	200	220

2 e Estágio 3. A variável diástole é definida para o intervalo de 80 a 115, conforme pode ser observado na Figura 40.

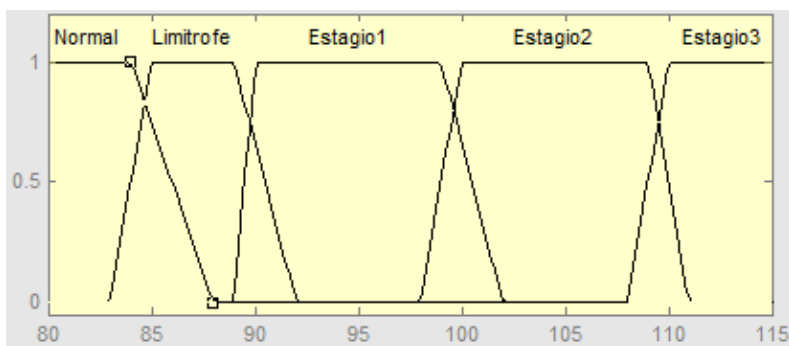


Figura 40 – Função de pertinência para a variável diástole.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável diástole são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Parâmetros escalares da variável diástole.

Conjunto	a	b	c	d
<i>Normal</i>	52	66	84	88
<i>Limítrofe</i>	83	85	89	92
<i>Estágio 1</i>	89	90	99	102
<i>Estágio 2</i>	98	100	109	111
<i>Estágio 3</i>	108	110	115	130

Para a representação da saída pressão alta foram definidos três conjuntos *fuzzy*, que correspondem às respostas utilizadas no projeto EPIDOSO: Não, Sim - não interfere na minha vida e Sim - interfere na minha vida. Os conjuntos são definidos por três funções trapezoidal (equação 3.14) distribuídas entre o suporte que varia de 0 a 1, conforme pode ser observado na Figura 41. O suporte da variável pressão alta foi definido com o objetivo de representar o grau com que a pressão alta interfere na vida do indivíduo, sendo 0 a interferência nula ou inexistente e 1 a interferência máxima.

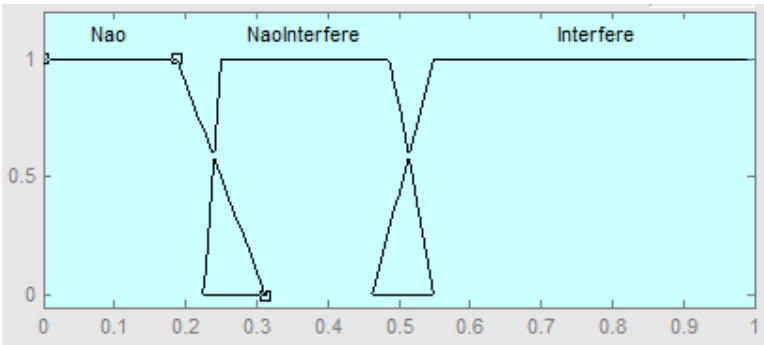


Figura 41 – Função de pertinência para a variável pressão alta.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável pressão alta são apresentados na Tabela 30.

A base de regras, apresentada na Figura 42, é composta por 25 regras SE-ENTÃO do tipo E formando sentenças como, por exemplo:

SE *sístole* é *normal* E *diástole* é *normal* ENTÃO *pressão alta* é *não*.

Tabela 30 – Parâmetros escalares da variável pressão alta.

Conjunto	a	b	c	d
<i>Não</i>	-0.5	0	0.1875	0.3125
<i>Sim - Não Interfere</i>	0.225	0.25	0.4875	0.55
<i>Sim - Interfere</i>	0.4625	0.55	1.05	1.45

Sístole	Diástole				
	<i>Normal</i>	<i>Limítrofe</i>	<i>Estágio 1</i>	<i>Estágio 2</i>	<i>Estágio 3</i>
<i>Normal</i>	Não	Sim - não interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere
<i>Limítrofe</i>	Sim - não interfere	Sim - não interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere
<i>Estágio 1</i>	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere
<i>Estágio 2</i>	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere
<i>Estágio 3</i>	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere	Sim - interfere

Figura 42 – Base de regras para pressão alta.

Após sucessivas simulações para calibração do modelo, os parâmetros do sistema *fuzzy* que possibilitaram os resultados mais condizentes com a realidade dos diagnósticos de pressão alta foram:

- T-Norma: mínimo;
- Implicação: mínimo;
- Agregação: máximo;
- Desfuzzificação: centroide.

A superfície de resposta, elaborada com base nas regras do módulo, é apresentada na Figura 43. Nela é possível perceber que para valores altos de sístole e diástole a pressão alta também apresenta valores altos, ou seja, próximos a 1. Já para valores pequenos nas entradas, a saída é baixa.

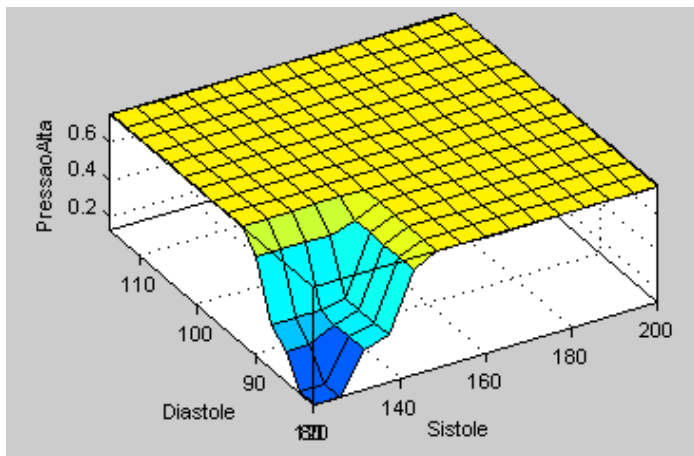


Figura 43 – Superfície de resposta: pressão alta.

4.3.2 Diabetes

A diabetes é uma doença metabólica caracterizada pelo aumento anormal do açúcar ou glicose no sangue. A glicose é a principal fonte de energia do organismo porém, quando em excesso, pode trazer várias complicações à saúde. Uma das formas de se detectar a diabetes em pacientes é quando o nível plasmático de glicose em jejum de 8h é maior ou igual a 126 mg/dL em duas ocasiões. Porém, quando o paciente apresenta nível de glicose no sangue em jejum entre 110 e 126 é diagnosticada a com glicose plasmática de jejum alterada, conhecida como pré-diabetes. Esse diagnóstico já exige que o paciente faça atividade física regular, perca peso e reduza muito seu consumo de carboidratos para não desenvolver diabetes (GROSS et al., 2002).

O sistema *fuzzy* que define a variável diabetes é formado por uma entrada, glicose, e por uma saída que é a diabetes. Foram criadas duas funções de pertinência, uma para a entrada e uma para a saída.

A variável glicose é determinada para um intervalo de 70 a 200 e é composta por três conjuntos: baixa, moderada e alta. Para a representação dos conjuntos foi adotada a função de pertinência resultante do produto de duas funções sigmoide (equação 3.16) para moderada; e a sigmoide (equação 3.15) para os conjuntos baixa e alta. Isto porque está se tratando de uma entrada com maior imprecisão em seus limites.

Pode-se dizer que este é um caso em que a nebulosidade predomina, ou seja, não existem valores conhecidos para que se pudesse ter uma aproximação, com faixas de valores mais bem definidas (KLIR; YUAN, 1995). A Figura 44 apresenta os conjuntos definidos para a glicose, cuja determinação foi orientada nas Diretrizes da Sociedade Brasileira de Diabetes (SOCIEDADE BRASILEIRA DE DIABETES, 2009).

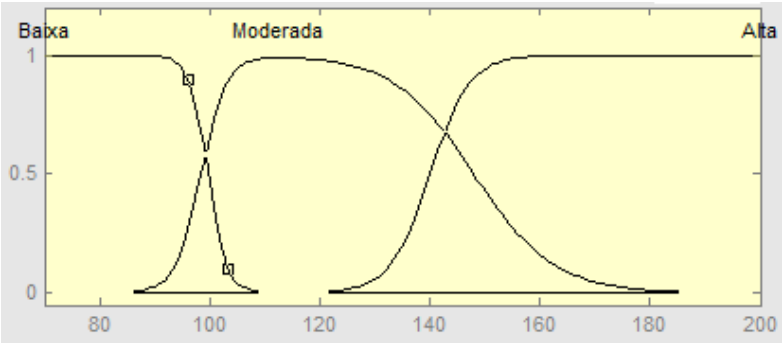


Figura 44 – Função de pertinência para a variável glicose.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável glicose são apresentados nas Tabelas 31 e 32.

Tabela 31 – Parâmetros escalares do conjunto moderada da variável glicose.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Moderada</i>	0.428	98.4	-0.138	148

Tabela 32 – Parâmetros escalares dos conjuntos baixa e alta da variável glicose.

Conjunto	a	c
<i>Baixa</i>	-0.584	99.73
<i>Alta</i>	0.2782	140

Para a representação da saída diabetes foram definidos três conjuntos *fuzzy*, que correspondem às respostas utilizadas no projeto EPI-DOSO: Não, Sim - não interfere na minha vida e Sim - interfere na

minha vida. O conjunto Sim - não interfere na minha vida foi definido por uma função de pertinência resultante do produto de duas sigmoides (equação 3.16). Já os conjuntos Não e Sim - interfere na minha vida foram definidos por funções sigmoides (equação 3.15). As funções de pertinência foram distribuídas entre o suporte da variável, que varia de 0 a 1, conforme pode ser observado na Figura 45. Da mesma forma como na variável pressão alta, o suporte da variável diabetes também foi definido com o objetivo de representar o grau de interferência da diabetes na vida do indivíduo, sendo 0 a interferência nula ou inexistente e 1 a interferência máxima.

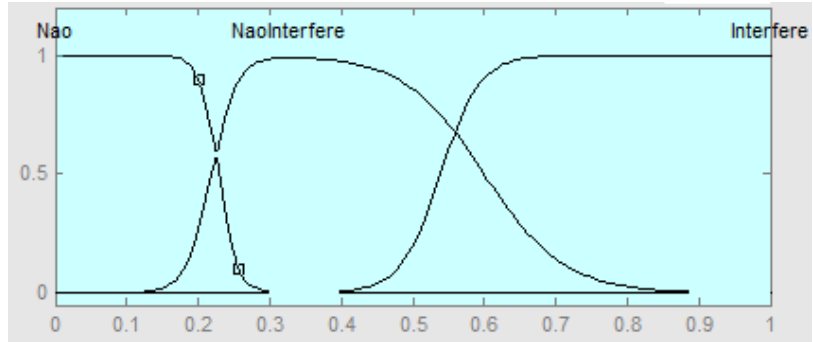


Figura 45 – Função de pertinência para a variável diabetes.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável diabetes são apresentados nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33 – Parâmetros escalares do conjunto sim - não interfere da variável diabetes.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Sim - Não Interfere</i>	55.64	0.2185	-17.94	0.6

Tabela 34 – Parâmetros escalares dos conjuntos não e sim - interfere da variável diabetes.

Conjunto	a	c
<i>Não</i>	-75.92	0.2287
<i>Sim - Interfere</i>	36.17	0.5385

A base de regras é composta por 3 regras SE-ENTÃO conforme Figura 46.

Glicose	Diabetes
Baixa	Não
Moderada	Sim - não interfere na vida
Alta	Sim - interfere na vida

Figura 46 – Base de regras para diabetes.

Os parâmetros do sistema *fuzzy* que possibilitaram os resultados mais condizentes com a realidade dos diagnósticos de diabetes foram:

- T-Norma: mínimo;
- Implicação: mínimo;
- Agregação: máximo;
- Desfuzzificação: centroide.

Na superfície de resposta apresentada na Figura 47 é possível perceber que para valores altos da glicose a diabetes apresente valores próximos a 1. Já para valores pequenos da entrada, a saída é baixa.

4.3.3 Obesidade

A obesidade é uma doença crônica multifatorial caracterizada quando a reserva natural de gordura de um indivíduo aumenta até o ponto em que passa a estar associada a certos problemas de saúde ou até mesmo ao aumento da taxa de mortalidade. Esse aumento de reserva ocorre sempre que o resultado do balanço energético é positivo, ou seja, a ingestão alimentar é superior ao gasto energético (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2000).

O sistema *fuzzy* que define a variável obesidade é formado por uma entrada, peso, e por uma saída que é a obesidade. Foram criadas duas funções de pertinência, uma para a entrada e uma para a saída.

A variável peso é determinada para um intervalo de -10 a 60 que representa o percentual relativo ao peso indicado para o indivíduo, ou seja, de 10% abaixo do peso até 60% acima do peso. Essa variável é composta por cinco conjuntos: -10, na média, +20, +50 e +60. Para

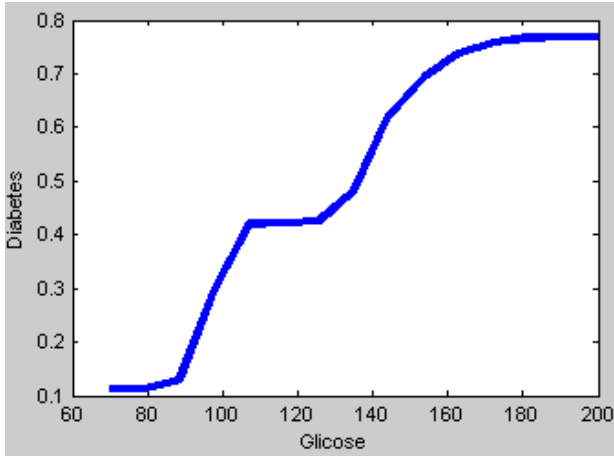


Figura 47 – Superfície de resposta: diabetes.

a representação dos conjuntos na média, +20 e +50 foram adotadas funções de pertinência resultantes do produto de duas funções sigmoide (equação 3.16) e para representar os conjuntos -10 e +60 foram adotadas funções sigmoide (equação 3.15). A Figura 48 apresenta os conjuntos definidos para o peso, cuja determinação foi orientada pelo indicador de risco peso das tabelas de Harvey Geller (CENTER FOR HEALTH PROMOTION AND EDUCATION (U.S.), 1982).

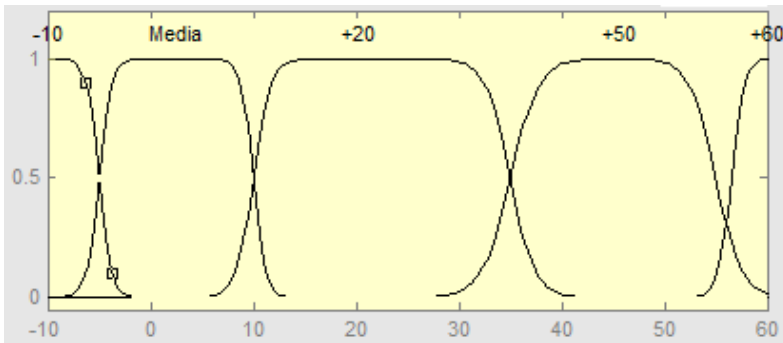


Figura 48 – Função de pertinência para a variável peso em percentual relativo.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável peso são apresentados nas Tabelas 35 e 36.

Tabela 35 – Parâmetros escalares dos conjuntos média, +20 e +50 da variável peso.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Média</i>	1.67	-5	-1.7	10
<i>+20</i>	1.2	10	-0.844	35
<i>+50</i>	0.73	35	-0.805	55

Tabela 36 – Parâmetros escalares dos conjuntos -10 e +60 da variável peso.

Conjunto	a	c
<i>-10</i>	-1.68	-5
<i>+60</i>	1.603	56.5

A variável de saída obesidade é definida por três conjuntos *fuzzy*, que também correspondem às respostas utilizadas no projeto EPI-DOSO: Não, Sim - não interfere na minha vida e Sim - interfere na minha vida. Assim como a variável diabetes, apresentada na seção 4.3.2, o conjunto Sim - não interfere na minha vida foi definido por uma função de pertinência resultante do produto de duas sigmóides (equação 3.16) e os conjuntos Não e Sim - interfere na minha vida foram definidos por funções sigmóides (equação 3.15). As funções de pertinência foram distribuídas entre o suporte da variável, que varia de 0 a 1, conforme pode ser observado na Figura 49. O suporte definido para a variável diabetes também tem o objetivo de representar o grau com que a obesidade interfere na vida do indivíduo, sendo 0 a interferência nula ou inexistente e 1 a interferência máxima.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável obesidade são apresentados nas Tabelas 37 e 38.

Tabela 37 – Parâmetros escalares do conjunto sim - não interfere da variável obesidade.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Sim - Não Interfere</i>	82.18	0.173	-26.9	0.501

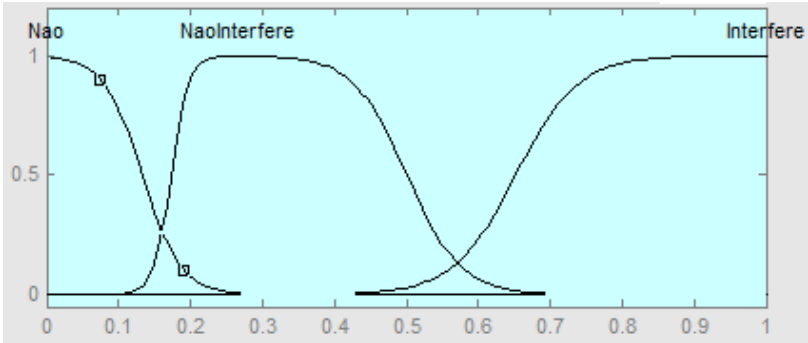


Figura 49 – Função de pertinência para a variável obesidade.

Tabela 38 – Parâmetros escalares dos conjuntos não e sim - interfere da variável obesidade.

Conjunto	a	c
<i>Não</i>	-37.5	0.1332
<i>Sim - Interfere</i>	23.04	0.652

A base de regras é composta por 5 regras SE-ENTÃO apresentadas na Figura 50 e sua formação é baseada na correspondência existente entre os valores de peso relativos e o IMC (Índice de Massa Corpórea)(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O ESTUDO DA OBESIDADE E DA SÍNDROME METABÓLICA, 2009).

Peso (percentual relativo)	Obesidade
-10	Não
Na média	Não
+20	Sim - não interfere na vida
+50	Sim - interfere na vida
+60	Sim - interfere na vida

Figura 50 – Base de regras para obesidade.

Os parâmetros do sistema *fuzzy* que possibilitaram os resultados mais condizentes com a realidade dos diagnósticos de obesidade foram:

- T-Norma: mínimo;
- Implicação: mínimo;
- Agregação: máximo;
- Desfuzzificação: centroide.

Na superfície de resposta apresentada na Figura 51, elaborada com base nas regras do módulo, é possível perceber que para valores altos do peso a obesidade apresenta valores próximos a 1. Já para valores pequenos da entrada, a saída é baixa.

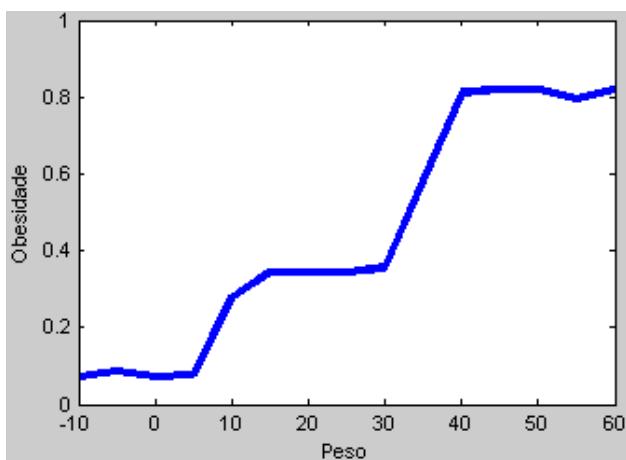


Figura 51 – Superfície de resposta: obesidade.

4.3.4 Envelhecimento

O sistema *fuzzy* que define a variável envelhecimento é formado por cinco entradas - pressão alta, diabetes, obesidade, exercício e sexo - e uma saída - envelhecimento. Entre as entradas, as variáveis pressão alta, diabetes e obesidades correspondem às variáveis de saída dos módulos *fuzzy* apresentados nas seções 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3. As entradas exercício e sexo são valores *crisp* com os seguintes valores:

- Exercício: Não, Sim - até 2 vezes por semana e Sim - 3 ou mais vezes na semana.

- Sexo: Masculino e Feminino.

A variável de saída envelhecimento é definida por quatro conjuntos *fuzzy*: lento, normal, moderado e acelerado. Os conjuntos normal e moderado são definidos por funções de pertinência resultantes do produto de duas sigmoides (equação 3.16). Já os conjuntos lento e acelerado são definidos por funções sigmoides (equação 3.15). As funções de pertinência são distribuídas entre o suporte da variável, que varia de 0.009 a 0.04, conforme pode ser observado na Figura 52.

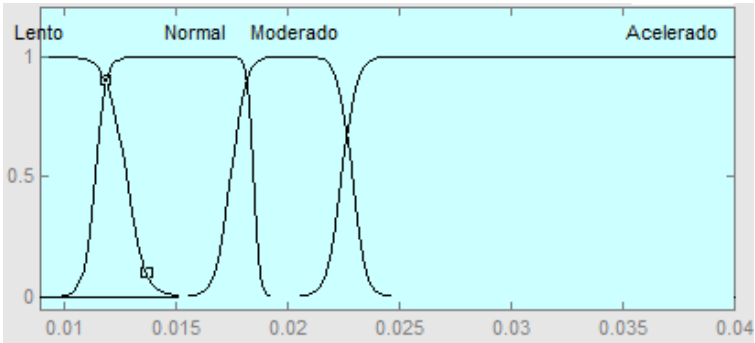


Figura 52 – Função de pertinência para a variável envelhecimento.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável envelhecimento são apresentados nas Tabelas 39 e 40.

Tabela 39 – Parâmetros escalares dos conjuntos normal e moderado da variável envelhecimento.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Normal</i>	4070	0.0114	-7145	0.0185
<i>Moderado</i>	3100	0.01748	-3350	0.0229

Tabela 40 – Parâmetros escalares dos conjuntos lento e acelerado da variável envelhecimento.

Conjunto	a	c
<i>Lento</i>	-2390	0.0128
<i>Acelerado</i>	3140	0.02245

A base de regras SE-ENTÃO do tipo E, apresentada na Figura 53, foi definida apenas para os quatro casos de estudo citados na seção 4.2.

Pressão alta	Diabetes	Obesidade	Exercício	Sexo	Envelhecimento
Não	Não	Não	Não	Masculino	Normal
Sim - não interfere	Não	Não	Não	Feminino	Moderado
Não	Não	Não	Sim - 3 ou mais vezes	Feminino	Normal
Não	Não	Não	Sim - 3 ou mais vezes	Masculino	Moderado

Figura 53 – Base de regras para envelhecimento.

Após as simulações para calibração do modelo, os parâmetros do sistema *fuzzy* que possibilitaram os resultados mais condizentes com o valores utilizados para a taxa de envelhecimento durante a validação do modelo foram:

- T-Norma: produto;
- Implicação: mínimo;
- Agregação: OU probabilístico;
- Desfuzzificação: maior dos máximos.

Com esses parâmetros, os valores resultantes do sistema *fuzzy* para taxa de envelhecimento, em cada um dos casos de estudo, são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Taxa de envelhecimento estimada para os casos de estudo.

Caso	Parâmetro Utilizado na Validação	Parâmetro Estimado pelo Módulo
Caso 1	0.018	0.0177
Caso 2	0.022	0.0214
Caso 3	0.018	0.0177
Caso 4	0.022	0.0214

De acordo com a Tabela 41, é possível observar que os valores estimados pelo módulo *fuzzy* se aproxima dos valores utilizados na

validação do modelo, mostrando que a modelagem apresentada é adequada para fornecer os valores do parâmetro taxa de envelhecimento a partir das características da população estudada.

4.3.5 Reserva

O sistema *fuzzy* que define a variável reserva é formado pelas mesmas entradas do módulo da taxa de envelhecimento, apresentado na seção 4.3.4.

A variável de saída reserva também é definida por quatro conjuntos *fuzzy*: lento, normal, moderado e acelerado, sendo os conjuntos normal e moderado definidos por funções de pertinência resultantes do produto de duas sigmoides (equação 3.16) e os conjuntos lento e acelerado definidos por funções sigmoides (equação 3.15). Essas funções são distribuídas entre o suporte da variável, que varia de 0.01 a 0.42, conforme pode ser observado na Figura 54.

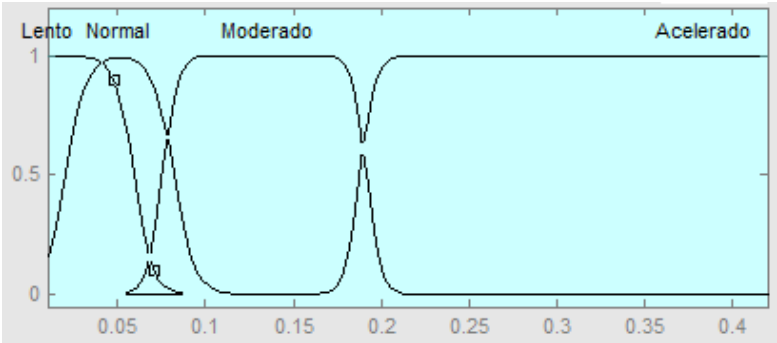


Figura 54 – Função de pertinência para a variável reserva.

Os parâmetros utilizados para determinar os conjuntos da variável reserva são apresentados nas Tabelas 42 e 43.

Tabela 42 – Parâmetros escalares dos conjuntos normal e moderado da variável reserva.

Conjunto	a1	c1	a2	c2
<i>Normal</i>	166	0.02008	-169	0.08203
<i>Moderado</i>	234.6	0.07534	-253.6	0.1917

Tabela 43 – Parâmetros escalares dos conjuntos lento e acelerado da variável reserva.

Conjunto	a	c
<i>Lento</i>	-187	0.05918
<i>Acelerado</i>	237.5	0.1879

A base de regras SE-ENTÃO do tipo E foi definida apenas para os quatro casos de estudo citados na seção 4.2 e pode ser observada na Figura 55.

Pressão alta	Diabetes	Obesidade	Exercício	Sexo	Reserva
<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Masculino</i>	Normal
<i>Sim - não interfere</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Feminino</i>	Normal
<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Sim - 3 ou mais vezes</i>	<i>Feminino</i>	Acelerado
<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Não</i>	<i>Sim - 3 ou mais vezes</i>	<i>Masculino</i>	Lento

Figura 55 – Base de regras para reserva.

Após as simulações para calibração do modelo, os parâmetros do sistema *fuzzy* que possibilitaram os resultados mais condizentes com o valores utilizados para a taxa de reserva durante a validação do modelo foram:

- T-Norma: mínimo;
- Implicação: mínimo;
- Agregação: OU probabilístico;
- Desfuzzificação: maior dos máximos.

Com esses parâmetros, os valores resultantes do sistema *fuzzy* para taxa de reserva, em cada um dos casos de estudo, são apresentados na Tabela 44.

De acordo com a Tabela 44, é possível observar que os valores estimados pelo módulo *fuzzy* se aproxima dos valores utilizados na validação do modelo, mostrando que a modelagem apresentada também é adequada para fornecer os valores do parâmetro taxa de reserva a partir das características da população estudada.

Tabela 44 – Taxa de reserva estimada para os casos de estudo.

Caso	Parâmetro Utilizado na Validação	Parâmetro Estimado pelo Módulo
Caso 1	0.05	0.051
Caso 2	0.05	0.051
Caso 3	0.42	0.42
Caso 4	0.03	0.03

4.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Este capítulo apresentou a avaliação dos resultados obtidos com o modelo ampliado através da comparação dos resultados obtidos com dados reais de mortalidade. Para isso, fez o levantamento de informações de mortalidade utilizando duas bases de dados: o projeto EPIDOSO e as informações da Fundação SEADE do Estado de São Paulo. Apesar da dificuldade na obtenção de uma base de dados representativa da população e que possuisse as informações necessárias para a validação do modelo, observou-se que o modelo ampliado apresentou bons resultados para a realidade estudada, dentro do intervalo esperado para os diversos casos estudados.

A análise da sensibilidade do modelo mostrou que alguns parâmetros causam mais impacto na mortalidade de faixas etárias menores da população, como é o caso dos parâmetros taxa de crescimento e taxa de reserva. Já os parâmetros taxa de envelhecimento, risco dependente de idade e fatores independentes de idade se relacionam com a mortalidade das faixas etárias maiores, podendo causar mortalidade precoce se estiverem muito elevados, ou retardar a mortalidade quando muito baixos.

A partir dessa análise de sensibilidade, foi possível modelar alguns sistemas de inferência *fuzzy* que se mostraram adequados para realizar a estimativa dos parâmetros do modelo a partir dos indicadores de risco. A incorporação desses sistemas *fuzzy* facilita e democratiza a utilização do modelo, uma vez que dispensa a busca pelo valor do parâmetro que produza o resultado mais condizente com a realidade. Com isso, não é necessário conhecer o funcionamento do modelo e as interações entre seus elementos, ou mesmo a fisiologia humana.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e a expansão de um modelo de simulação de envelhecimento e morte da população que, além de representar as funções fisiológicas do indivíduo, expressa a ocorrência de eventos de risco ao longo da vida do sujeito que podem acontecer tanto de forma acidental quanto em consequência da idade. A proposta de ampliação do modelo consistiu na inclusão de indicadores de risco que remetem aos hábitos de vida e às condições de saúde da população e na utilização desses indicadores para definir a probabilidade dos indivíduos serem acometidos ou virem a óbito em decorrência de uma determinada doença. Por se encontrar entre as principais causas de morte no mundo todo, as doenças cardiovasculares foram o foco da proposta cujo objetivo é simular o comportamento de populações que apresentam um conjunto de fatores característicos para a incidência dessa causa de morte.

Sistemas com estas características podem ser considerados de alta complexidade pois possuem uma grande quantidade de elementos e variáveis envolvidos. No contexto da dinâmica do envelhecimento, tema deste trabalho, entre os fatores envolvidos podemos citar, por exemplo, riscos associados à idade, fatores aleatórios que são independentes de idade, fatores envolvidos na fisiologia humana e, ainda, os riscos dependentes dos hábitos de vida e das condições de saúde do indivíduo. Diante dessas características, a modelagem e simulação dinâmica contínua e a modelagem *fuzzy* se apresentam como alternativas viáveis tanto para o tratamento das mudanças que ocorrem continuamente ao longo do tempo quanto para o tratamento das incertezas inerentes ao sistema.

A fundamentação teórica apresentada no capítulo 2 abordou os principais assuntos relacionados a esta pesquisa, descrevendo conceitos da modelagem e simulação dinâmica contínua e da lógica *fuzzy*. Este trabalho foi desenvolvido utilizando a metodologia Dinâmica de Sistemas, que tem como um de seus principais objetivos proporcionar um entendimento aprofundado dos elementos envolvidos no modelo e do comportamento das variáveis ao longo do tempo mesmo quando não há um modelo matemático bem definido acerca do problema abordado. Essa metodologia facilita ainda a contribuição de profissionais de outras áreas de conhecimento para a construção de modelos de simulação. Especificamente na área médica e de saúde, é possível observar a prevalência de informações incertas. O modelo hierárquico de ignorância

proposto por (AYYUB, 2001) sugere as técnicas de modelagem *fuzzy* como apropriadas para o tratamento de problemas que apresentam vagueza e imprecisão.

O processo de envelhecimento é tema de estudos há muitos anos, contando inclusive com o desenvolvimento de teorias e modelos matemáticos relacionados ao assunto. Apesar do número notável de teorias, a falta de experimentação e de modelos de simulação relacionados ao tema é evidente. Modelos de simulação capazes de retratar o comportamento de uma população ao longo do tempo podem ser utilizados tanto para o estudo de populações quanto para elaboração e validação de estratégias e políticas de prevenção, podendo possibilitar o aumento da qualidade de vida da população e a diminuição dos custos dos programas de saúde públicos ou privados.

5.1 PROPOSTA E RESULTADOS

O modelo que serviu de base para o desenvolvimento desta pesquisa foi desenvolvido como trabalho de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Santa Catarina (SCHWAAB, 2009). A ferramenta de simulação estocástica construída, além de expressar características da fisiologia humana, possibilita a simulação de eventos de risco que podem ocorrer no decorrer da vida de um indivíduo.

A primeira tarefa realizada foi o estudo aprofundado do modelo base com o objetivo de compreender seu comportamento ao longo do tempo. O modelo é composto por cinco parâmetros - taxa de crescimento, taxa de reserva, taxa de envelhecimento, risco independente de idade e fator dependente de idade - que, juntos, determinam a capacidade fisiológica do indivíduo e a probabilidade de ocorrência de eventos que põem em risco a sobrevivência do sujeito. O fator de risco, diferenciado e dinâmico, aumenta gradualmente com o aumento da idade, se ajustando aos valores de risco adequados à faixa etária e modelando o comportamento da capacidade de um indivíduo, que decai com o passar dos anos. O módulo *fuzzy* de impacto e recuperação da saúde representa duas questões observadas em sistemas vivos: o impacto de um evento de risco na saúde do indivíduo, representado por meio de sequelas, e a recuperação da saúde após este problema. A recuperação do indivíduo diante da ocorrência de um evento de risco é a saída do sistema *fuzzy* e sua determinação depende da idade do indivíduo ao sofrer o risco e do impacto que esse representou em sua saúde. A modelagem

realizada e a base de regras utilizada determinam que a capacidade de recuperação do indivíduo é inversamente proporcional a sua idade e ao impacto do evento ocorrido.

Com esse estudo inicial foi possível identificar a melhor forma de implementação da expansão do modelo. A ampliação incorporou elementos vindos das tábuas de vida de Harvey Geller para o cálculo do fator de risco composto, que indica o risco que um indivíduo apresenta para uma determinada causa de morte. Esse risco é calculado a partir de indicadores de risco individuais aplicáveis para a causa de morte em questão. As entradas para o cálculo são os valores de cada indicador, que variam de acordo com o sexo e a idade do indivíduo. Os indicadores considerados para doenças cardiovasculares são: sístole, diástole, colesterol, diabetes, atividade física, tabagismo e obesidade (HARGROVE, 1998). O fator de risco composto é então utilizado para determinar a probabilidade de morte do indivíduo, que leva também em consideração a taxa de mortalidade provável para faixa etária em que o indivíduo se encontra. Com essa nova forma de calcular a probabilidade de morte, o limite de sobrevivência também foi alterado para ser derivado da probabilidade de morte calculada, fazendo com que o comportamento da função limite de sobrevivência reflita o impacto que o fator de risco composto representa para a sobrevivência do indivíduo.

Após a expansão do modelo foi realizado um projeto fatorial simples que avaliou o impacto de cada um dos parâmetros na saída do modelo. Os cinco parâmetros do modelo - taxa de crescimento, taxa de reserva, taxa de envelhecimento, risco independente de idade e fator dependente de idade - foram analisados independentemente com relação ao impacto na mortalidade das diferentes faixas etárias das populações estudadas. A análise da sensibilidade do modelo mostrou que alguns parâmetros causam mais impacto na mortalidade de faixas etárias menores, como é o caso dos parâmetros taxa de crescimento e taxa de reserva. Já os parâmetros taxa de envelhecimento, risco dependente de idade e fatores independentes de idade se relacionam com a mortalidade das faixas etárias maiores, podendo causar mortalidade precoce quando estão muito elevados, ou retardar a mortalidade quando estão muito baixos. Esse estudo foi fundamental para o entendimento adequado dos fatores do modelo.

A validação dos dados produzidos pelo simulador foi realizada com a parametrização e a execução de simulações para a reprodução de curvas de mortalidade de populações consideradas homogêneas com relação aos indicadores de risco. Apesar da dificuldade referente à obtenção de dados reais da população, foram obtidas as curvas de morta-

lidade reais da população derivadas de informações epidemiológicas e de mortalidade fornecidos pelo projeto EPIDOSO (RAMOS et al., 1998) e pela Fundação SEADE (SÃO PAULO, 2011) do estado de São Paulo. Para possibilitar a utilização desses dados, as informações sobre mortes ocorridas decorrentes de doenças do aparelho circulatório foram agrupadas em casos que consideravam as variáveis do modelo de simulação proposto - pressão alta, diabetes, obesidade e atividade física. Na seleção dos casos de estudo para serem avaliados, foram selecionados os 4 casos que mais apresentaram óbitos. Os resultados foram considerados aceitáveis, já que os verdadeiros valores estavam entre os intervalos de confiança gerados com os resultados das simulações.

Para a obtenção dos resultados foram efetuadas numerosas simulações com diversas variações de parâmetros guiadas pelo projeto fatorial efetuado no modelo ampliado. Com isso, o modelo ampliado pôde ser considerado adequado para a reprodução de curvas de mortalidade reais de populações homogêneas, dado um intervalo de confiança de 95%. Reproduzir curvas reais de mortalidade, além propiciar a validação do modelo de simulação, representa um passo inicial de parametrização para a utilização do simulador para testes com situações que envolvam outras populações.

Diante dessa situação, foi desenvolvido um módulo de inferência *fuzzy* com o objetivo de estimar os valores dos parâmetros do modelo a partir dos indicadores de risco. Esse módulo possibilita que o modelo seja utilizado por usuários que não possuem conhecimento aprofundado da fisiologia humana. Os parâmetros estimados através desta solução são a taxa de envelhecimento e de reserva e, para cada um deles, três indicadores de risco constantes no projeto EPIDOSO são utilizados como entrada - pressão alta, diabetes e obesidade. Para definir o valor da variável a pressão alta foi desenvolvida uma máquina de inferência cujas entradas são os indicadores sístole e diástole. A base de regras modelada define que quanto maior a medida da sístole e da diástole, maior a gravidade da hipertensão. Depois desse tratamento, a gravidade da hipertensão é classificada de acordo com sua interferência na vida do indivíduo. Para a diabetes, uma máquina de inferência transforma o valor da medida da glicose na interferência da diabetes na vida do indivíduo. De forma semelhante, a máquina de inferência desenvolvida para determinar a interferência da obesidade na vida do sujeito tem como entrada a diferença de peso em relação ao peso indicado para o indivíduo. Por fim, esses três indicadores de risco, juntamente com informações sobre o sexo do indivíduo e a prática de exercícios físicos, determinam o valor dos parâmetros taxa de envelhecimento e taxa de

reserva de acordo com as bases de regras definidas para o cálculo de cada parâmetro.

Em relação ao ganho real, a inclusão dos indicadores de risco no cálculo da probabilidade de morte possibilitou o ajuste adequado dos resultados das simulações aos valores reais das taxas de mortalidade de populações de diversas realidades. Isso porque os hábitos de vida e as condições de saúde causam influências na mortalidade de diversas faixas etárias, principalmente nas mais altas. Uma das principais dificuldades na utilização do modelo estava relacionada à parametrização que, de certa forma, exige conhecimento aprofundado da influência dos fatores no resultado e da população que se deseja estudar. Com a implementação do módulo *fuzzy* que estima valores adequados para os parâmetros a partir dos indicadores de risco, a utilização do modelo foi facilitada. Além de dispensar a busca pelo valor do parâmetro que produza o resultado mais condizente com a realidade, essa solução democratiza a utilização do modelo, que agora pode ser utilizado por pessoas que atuem em outras áreas de conhecimento, sem ser necessário conhecer sobre o modelo em si, sobre medicina ou fisiologia humana.

Este modelo pode ser considerado de grande importância estratégica, uma vez que seus resultados são sensíveis a variáveis que podem ser derivadas de dados coletados em bases epidemiológicas e tábuas de sobrevivência. Por permitir a replicação de curvas de mortalidade, o modelo ampliado permite que estratégias baseadas nas mudanças dos indicadores de risco sejam executadas e testadas e, a partir da observação dos efeitos que as mudanças causam na saída do modelo, é possível planejar políticas e intervenções para a promoção da saúde de populações, amenizando a incidência e a mortalidade causada, neste caso, por doenças cardiovasculares. Com isso, o modelo ainda facilita a realização de cálculos e planejamento de custos para programas de saúde relacionados à prevenção.

5.1.1 Artigos

O desenvolvimento deste trabalho gerou 2 artigos que foram aceitos nos seguintes eventos:

- ***Winter Simulation Conference* 2011**

Título: *Dynamic Mortality Simulation Model Incorporating Risk Indicators for Cardiovascular Diseases*

Segmento: *Health Care*

- ***European Modeling and Simulation Symposium 2011***

Título: *Dynamic Model of Ageing and Risk: The Application of Risk Indicators to Determination of Probability of Death*

Segmento: *Health Care*

5.2 LIMITAÇÕES

Apesar dos resultados promissores obtidos com o modelo ampliado, a dificuldade na obtenção de uma base de dados que dispusesse de informações tanto sobre as características de uma população quanto de sua mortalidade limitou o desenvolvimendo deste trabalho com relação aos seguintes itens:

- Como o projeto EPIDOSO foi um estudo voltado ao idoso, os participantes do projeto apresentavam 65 anos ou mais já no início do estudo. Isso impossibilitou a validação dos resultados do modelo para faixas etárias menores de 60 anos;
- A pouca quantidade de dados também foi um fator que prejudicou a validação dos resultados do modelo. Dos 1667 participantes, 820 vieram a óbito, dos quais apenas 163 foram decorrentes de doenças cardiovasculares. Entre esses óbitos, poucos casos puderam ser considerados representativos. Com isso, não foi possível validar os resultados do modelo para todas as combinações possíveis de indicadores de risco;
- Ainda devido a pouca diversidade de casos considerados representativos, as bases de regras do módulo *fuzzy* para estimativa dos parâmetros estão limitadas aos casos selecionados. Como as definições dos parâmetros estão inseridas em um contexto de muita incerteza, estudos complexos que envolvem ainda muitos questionamentos serão necessários para completar as bases de regras;
- O questionário do projeto EPIDOSO não continha todos os indicadores de risco possíveis para o estudo de doenças cardiovasculares. Com isso, o modelo não considera, por exemplo, os efeitos que os hábitos de fumar e consumir álcool causam na mortalidade relacionada a esses tipos de doenças.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

O modelo ainda necessita de melhorias na modelagem. O cálculo do fator de risco composto, apresentado na seção 3.2.1, foi implementado considerando intervalos de valores para os indicadores de risco. Dessa forma, a alteração nos valores dos indicadores mais influentes causa variações abruptas nas curvas de mortalidade obtidas quando enquadrados em diferentes faixas dos intervalos. Devido a natureza vaga dos indicadores, a realização desse cálculo poderia ser aprimorada através de um sistema especialista, de forma semelhante ao que foi proposto para o módulo de estimativa de parâmetros. Com isso, as alterações dos indicadores de risco, por menor que fossem, poderiam gerar curvas de mortalidade variadas, relativas à alteração realizada no indicador.

Além disso, a modelagem do valor dos parâmetros envolve conceitos da matemática difusa, reconhecendo que esses valores são números *fuzzy*. Seus valores vagos não possuem embasamento claro para a sua determinação. Dessa forma, os valores dos parâmetros poderiam ser tratados em um contexto de aproximação, através de um número *fuzzy*.

Ainda como trabalho futuro é possível explorar o modelo ampliado como uma aplicação prática no estudo da viabilidade de estratégias e implementação de medidas preventivas de saúde. Estudos estratégicos relacionados a situações de risco de populações e aos custos financeiros, como investimentos de planos de saúde e de previdência, por exemplo, podem ser realizados. Com isso, a utilização do modelo pode contribuir de forma efetiva para a avaliação de tais situações.

REFERÊNCIAS

- ACKOFF, R. L. Towards a system of system concepts. *Management Science*, v. 17, n. 11, p. 661–671, Julho 1971.
- AHMAD, S. Increasing excise taxes on cigarettes in California: a dynamic simulation of health and economic impacts. *Preventive Medicine*, v. 41, p. 276–283, 2005.
- AHMAD, S.; FRANZ, G. A. Raising taxes to reduce smoking prevalence in the US: a simulation of the anticipated health and economic impacts. *Public Health*, v. 122, p. 3–10, 2008.
- ASHFORD, A. C. Unexpected behavior in higher order positive feedback loops. Preparado pelo MIT System Dynamics in Education Project. Maio 1995. <<http://sysdyn.clexchange.org/sdep/Roadmaps/RM7/D-4455-2.pdf>>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O ESTUDO DA OBESIDADE E DA SÍNDROME METABÓLICA. *Diretrizes Brasileiras de Obesidade 2009/2010*. 3. ed. Itapevi, SP: AC Farmacêutica, 2009.
- AYYUB, B. M. *Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks*. [S.l.]: CRC Press, 2001.
- BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. *Estatística para Cursos de Engenharia e Informática*. Florianópolis: Atlas, 2004.
- BRASIL. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. 2012. Acessado em 21 de Março de 2012. <<http://www.ibge.gov.br>>.
- CECCONELLO, M. S. *Modelagem Alternativa para Dinâmica Populacional: Sistemas Dinâmicos Fuzzy*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Campinas, SP, 2006.
- CENTER FOR HEALTH PROMOTION AND EDUCATION (U.S.). *Probability of dying within the next 10 years at selected ages for 40 major causes*. Atlanta: Center for Health Promotion and Education, Centers for Disease Control, DHHS, 1982. 18 p.
- DEATON, M. L.; WINEBRAKE, J. J. *Dynamic Modeling of Environmental Systems*. New York: Springer-Verlag, 2000.

FINKELSTEIN, M. S. On engineering reliability concepts and biological aging. In: *MPIDR Working Papers WP-2006-021*. Rostock: Max Planck Institute for Demographic Research, 2006.

FORD, A. *Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Modeling of Environmental Systems*. Washington: Island Press, 1999.

FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. Waltham: Productivity Press, 1961.

FORRESTER, J. W. *Urban Dynamics*. Waltham: Pegasus Communications, Inc., 1969.

FORRESTER, J. W. System dynamics, system thinking, and soft OR. *System Dynamics Review*, v. 10, n. 2, p. 245–256, 1994.

FORRESTER, J. W. Designing the future. Trabalho apresentado na Universidade de Sevilla. Dezembro 1998. <<http://sysdyn.clexchange.org/sdep/papers/Designjf.pdf>>.

FREITAS FILHO, P. J. *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena*. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GHAZANFARI, M.; ALIZADEH, S.; JAFARI, M. Using fuzzy expert system for solving fuzzy system dynamics models. *EurAsia-ICT 2002*, p. 349–353, Outubro 2002.

GLICK, M.; DUHON, T. Generic structures: S-shaped growth i. Produzido pelo MIT System Dynamics in Education Project. Agosto 1994. <<http://sysdyn.clexchange.org/sdep/Roadmaps/RM5/D-4432-2.pdf>>.

GOETZ, A. A.; DUFF, J. F.; BERNSTEIN, J. E. Health risk appraisal: the estimation of risk. *Public Health Rep*, v. 95, n. 2, p. 119–126, 1980.

GOMPERTZ, B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, London, p. 513–585, 1825.

GROSS, J. L. et al. Diabetes melito: diagnóstico, classificação e avaliação do controle glicêmico. *Arquivos Brasileiros de Endocrinologia e Metabologia*, v. 46, n. 1, p. 16–26, Fevereiro 2002.

HALL, J. H.; ZWEMER, J. D. *Prospective Medicine*. Indianapolis: Department of Medical Education, Methodist Hospital of Indiana, 1979.

HALLEN, A. Gompertz law and aging as exclusion effects. *Biogerontology*, v. 8, n. 5, p. 605–612, Julho 2007.

HALLEY, E. An estimate of the degrees of the mortality of mankind, drawn from curious tables of the births and funerals at the city of breslaw; with an attempt to ascertain the price of annuities upon lives. *Philosophical Transactions (1683-1775)*, v. 17, p. 596–610, 1693.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. *Monte Carlo Methods*. London: Methuen, 1964.

HARGROVE, J. L. *Dynamic Modeling in the Health Sciences*. New York: Springer-Verlag, 1998.

HAYFLICK, L. *Como e Por Que Envelhecemos*. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

HOEGER, W. W. K. *The Complete Guide for the Development and Implementation of Health Promotion Programs*. Englewood, Colorado: Morton Publishing Co., 1987.

JAFELICE, R. S. M. *Modelagem Fuzzy para Dinâmica de Transferência de Soropositivos para HIV em Doença Plenamente Manifesta*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2003.

JOHANSEN, R. J. Annuity 2000 mortality tables. *Transactions of Society of Actuaries*, 1996. 1995-96 Reports.

KANNEL, W. B. CHD risk factors: a Framingham study update. *Hospital Practice Office ed*, v. 25, n. 7, p. 119–130, Julho 1990.

KANNEL, W. B. Long-term epidemiologic prediction of coronary disease. The Framingham experience. *Cardiology*, v. 83, n. 2-3, p. 137–152, 1993.

KARAVEZYRIS, V.; TIMPE, K.-P.; MARZI, R. Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 60, n. 3-5, p. 149–158, 2002.

KLIR, G. J.; YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

KUNSCH, P.; SPRINGAEL, J. Simulation with system dynamics and fuzzy reasoning of a tax policy to reduce CO2 emissions in the residential sector. *European Journal of Operational Research*, v. 185, n. 3, p. 1285–1299, Março 2008.

LEVARY, R. R.; LIN, C. Y. Modelling the software development process using an expert simulation system having fuzzy logic. *Software - Practice and Experience*, v. 21, p. 133–148, Fevereiro 1991.

MAANI, K. E.; CAVANA, R. Y. *Systems Thinking and Modeling: Understanding Change and Complexity*. Auckland: Person Education, 2000.

MAKEHAM, W. M. On the law of mortality and the construction of annuity tables. *The Assurance Magazine, and Journal of the Institute of Actuaries*, v. 8, p. 301–310, Janeiro 1860.

MAKOWIEC, D.; STAUFFER, D.; ZIELINSKI, M. Gompertz law in simple computer model of aging of biological population. *International Journal of Modern Physics C*, v. 12, n. 7, p. 1067–1073, 2001.

MARTIN, L. A. An introduction to feedback. Preparado pelo MIT System Dynamics in Education Project. Outubro 1997.
<<http://sysdyn.clexchange.org/sdep/Roadmaps/RM2/D-4691.pdf>>.

NEBOT, A. et al. Modeling and simulation of the central nervous system control with generic fuzzy models. *SIMULATION - Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, v. 79, p. 648–669, Novembro 2003.

OLIVEIRA, P. M. et al. Penna ageing model and improvement of medical care in 20th century. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 273, n. 1-2, p. 145–149, Novembro 1999.

ORTEGA, N. R. S.; BARROS, L. C.; MASSAD, E. Fuzzy gradual rules in epidemiology. *Kybernetes*, v. 32, p. 460–477, 2003.

ORTEGA, N. R. S.; SALLUM, P. C.; MASSAD, E. Fuzzy dynamical systems in epidemic modelling. *Kybernetes*, v. 29, p. 201–218, 2000.

PENNA, T. J. P. A bit-string model for biological aging. *Journal of Statistical Physics*, v. 78, n. 5-6, p. 1629–1633, 1995.

RACCO, A. *Modelos Computacionais para Dinâmica de Populações Reais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal Fluminense. Instituto de Física, Niterói, 2003.

RADZICKI, M. J.; TAYLOR, R. A. Introduction to system dynamics: A systems approach to understanding complex policy issue. Preparado pelo U.S. Department of Energy. 1997. <<http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDyn/inside.htm>>.

RAINES, J. R.; ELLIS, L. B. M. A conversational microcomputer-based health risk appraisal. *Computer Programs in Biomedicine*, v. 14, n. 2, p. 175–183, Abril 1982.

RAMOS, L. R. et al. Two-year follow-up study of elderly residents in S. Paulo, Brazil (Epidoso Project): methodology and preliminary results. *Revista Saúde Pública*, v. 5, p. 397–407, 1998.

RICHARDSON, G. P. Problems with causal-loop diagrams. *System Dynamics Review*, v. 2, n. 2, p. 158–170, 1986.

RICHMOND, B. M. *An Introduction to Systems Thinking: STELLA software guide book*. Lebanon: High Performance Systems, Inc., 2004.

ROBERTS, N. et al. *Introduction to Computer Simulation: A System Dynamics Modeling Approach*. Portland: Productivity Press, Inc., 1994.

ROSS, T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 2. ed. New York, NY, US: John Wiley & Sons, 2004.

SCHWAAB, A. A. S. *Modelagem Dinâmica-Fuzzy Aplicada a um Modelo de Envelhecimento e Risco*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Informática e Estatística, Florianópolis, 2009.

SÃO PAULO. *Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados*. 2011. Acessado em 2 de Março de 2011. <<http://www.seade.gov.br>>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CARDIOLOGIA. VI Diretrizes Brasileiras de Hipertensão. *Revista Brasileira de Hipertensão*, v. 17, n. 1, Janeiro/Março 2010.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE DIABETES. *Diretrizes da Sociedade Brasileira de Diabetes 2009*. 3. ed. Itapevi, SP: A. Araújo Silva Farmacêutica, 2009.

STAUFFER, D.; RADOMSKI, J. P. Social effects in simple computer model of aging. *Experimental Gerontology*, v. 37, n. 1, p. 175–180, Dezembro 2001.

STREHLER, B. L. Understanding aging. *Aging Methods and Protocols*, Humana Press, Totowa, p. 1–19, 2000.

STREHLER, B. L.; MILDVAN, A. S. General theory of mortality and aging. *Science*, v. 132, n. 3418, p. 14–21, Julho 1960.

TAFFE, W. J. Simulation and modelling with Stella: a general education course. *SIGCSE Bull.*, v. 23, n. 1, p. 87–91, Março 1991.

THE SOCIETY OF ACTUARIES. 2012. Acessado em 21 de Março de 2012. <<http://www.soa.org>>.

THESEN, A.; TRAVIS, L. E. Simulation for decision making: An introduction. In: *Proceedings of the 21st Conference on Winter Simulation*. New York: ACM, 1989. (WSC '89), p. 9–18.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Obesity: Preventing and Managing the Global Epidemic*. Geneva: World Health Organization, 2000. (Technical Report Series).

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *ICD-10: International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems: Tenth Revision*. 2. ed. Geneva: World Health Organization, 2010.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.

ANEXO A – Fator de Risco Composto

Tabela de Fatores de Risco Feminino											
Indicadores De Risco	Idade										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Pressão Sistólica											
200	5,3	5,3	5,3	4,8	4,3	3,9	3,6	3,2	2,9	2,7	2,4
180	3,2	3,2	3,2	3	2,7	2,5	2,3	2,1	2	1,8	1,7
160	2	2	2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
140	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1	1	0,9	0,9	0,8	0,8
120	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Pressão Diastólica											
105	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2
100	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
95	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
90	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
85	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1
80	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Colesterol											
280	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
220	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
180	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Diabetes											
Diabético	39,6	39,6	32,4	26,6	21,8	17,8	14,6	12	9,8	8	6,6
Controlado	16,7	16,7	13,7	11,2	9,2	7,5	6,2	5,1	4,1	3,4	2,8
Não Diabético	1	1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9
Exercício											
Sedentário	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Pouco	1	1	1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4
Moderado	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Vigoroso	1	1	1	1	1	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6
Prescrever exercício para sedentários	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Prescrever exercício para outros	1	1	1	1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6
Fumante (cigarros/dia)											
20-39	3,2	3,2	2,9	2,7	2,4	2,2	2	1,8	1,7	1,5	1,4
10-19	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2
1-9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Não Fumante											
Não Fumante	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
Peso											
60% acima	5,9	5,9	4,6	3,5	2,7	2,1	1,6	1,2	1	1	1
50% acima	3,9	3,9	3,2	2,6	2,2	1,8	1,4	1,2	1	1	1
20% acima	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1	1	1	1
Peso Médio	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1	1	1
10% abaixo	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1	1	1

Tabela de Fator de Risco Masculino											
Indicadores De Risco	Idade										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Pressão Sistólica											
200	5,3	5,3	5,3	4,8	4,3	3,9	3,6	3,2	2,9	2,7	2,4
180	3,2	3,2	3,2	3	2,7	2,5	2,3	2,1	2	1,8	1,7
160	2	2	2	1,9	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1
140	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1	1	0,9	0,9	0,8	0,8
120	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Pressão Diastólica											
105	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2
100	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
95	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
90	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
85	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1
80	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Colesterol											
280	2,2	2,2	2	1,8	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1	1
220	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1
180	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1
Diabetes											
Diabético	7,4	7,4	6,9	6,3	5,8	5,4	5	4,6	4,2	3,9	3,6
Controlado	3,8	3,8	3,5	3,2	3	2,7	2,5	2,3	2,1	2	1,8
Não Diabético	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Exercício											
Sedentário	1	1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,6
Pouco	1	1	1	1	1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3
Moderado	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Vigoroso	1	1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Prescrever exercício para sedentários	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Prescrever exercício para outros	1	1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7
Fumante (cigarros/dia)											
40+	3	3	2,7	2,4	2,2	2	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2
20-39	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2
10-19	1	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
1-9	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1
Ex-fumante 1-19 cigarros/dia (anos atrás)											
1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1	1
01-04	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9
10-17	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8

Tabela de Fator de Risco Masculino (continuação)											
Indicadores De Risco	Idade										
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Ex-fumante 20+ cigarros/dia (anos atrás)											
1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1
1-4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
10-19	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9
20	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
Não Fumante											
Não Fumante	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8
Peso											
60% acima	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
50% acima	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4
20% acima	0,9	0,9	0,9	0,9	1	1	1	1	1	1	1
Peso Médio	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
10% abaixo	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7